



Sveriges
lantbruksuniversitet

Skogsavverkningens påverkan på grundvattnets flödesvägar

The effect of clear-cut on groundwater
flow pathways

Emil Vikberg

REFERAT

Skogsavverkningens påverkan på grundvattnets flödesvägar

Emil Vikberg

I Sverige avverkas stora mängder skog varje år vilket ger stora skogsområden som är helt kalhuggna. Avverkning av skogen leder till att evapotranspirationen och interceptionen från växter minskar. Detta ger en ökad grundvattenbildning som i sin tur leder till en ökad avrinning i vattendragen som avvattnar de avverkade skogsområdena. Den ökade vattentillgången i de avverkade områdena leder till att grundvattenytan höjs. Den höjda grundvattenytan gör att ytterligare markskikt närmare markytan kopplas samman med vattendraget. De övre markskikten har en högre halt av DOC och näringsämnen som kan komma att transporteras ut med grundvattnet till vattendragen och kan på så vis ändra vattenkvaliteten i vattendrag och sjöar.

Syftet med det här examensarbetet har varit att utreda vilka mekanismer som ligger bakom höjningen av grundvattenytan efter avverkning i ett område kring Balsjö i Västerbottens län. I studien användes tre delområden varav två var avverkade, det ena var helt kalavverkat, det andra med en kvarlämnad buffertzonsområde närmast bäcken och det tredje området hade lämnats orört som ett referensområde. Avverkningen i området skedde under mars månad 2006. Tidigare studier har visat att det finns ett exponentiellt samband mellan grundvattennivå och vattenföring. Utifrån detta samband togs modeller fram. Modellerna användes sedan tillsammans med vattenföringen för varje delområde för att generera grundvattensituationen för åren 2005, 2007 och 2009.

Undersökningen visade att det hade skett en förändring i sambandet mellan grundvattennivån i marken och vattenföringen i vattendraget efter avverkningen. Detta innebar att grundvattennivån låg närmare markytan efter avverkningen vid samma vattenföring. Den största höjningen av sambandet hade skett i det kalavverkade området och en liten höjning kunde även ses i referensområdet. Detta innebar att två olika mekanismer, ökat flöde i vattendraget och ändrat samband mellan grundvattennivå och vattenföringen, bidrog till höjningen av grundvattennivån. Enbart sambandets inverkan på framrunnen volym grundvatten och placeringen i marken visade att det både hade skett en höjning av grundvattenytan samt att en ökad volym grundvatten hade runnit genom markskikten. Den ökade avrinningens inverkan på grundvattennivån visade att det var endast vid låga flöden som en höjning av grundvattenytan hade skett. Den framrunna volymen grundvatten vid ökad avrinning låg på samma nivå i marken efter avverkningen men volymen hade ökat. De slutsatser som kunde dras från resultaten var att det har skett en förändring i markens struktur efter avverkningen och att denna förändring hade störst effekt i det kalavverkade området jämfört med buffertzonsområdet (med förutsättning att bäcken inte har dämats upp vilket kan ha påverkat de låglänta områdena nära bäcken). Ökningen i avrinning bidrar endast med en liten del till den ökade grundvattennivån.

Nyckelord: Grundvatten, flödesvägar, skogsavverkning, grundvattennivå

Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet

Vallvägen 3, SE-756 51 Uppsala

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

The effect of clear-cutting on groundwater flow pathways

Emil Vikberg

In Sweden large amounts of forest are being clear-cut every year. This leads to large areas that are totally bare of trees. Clear-cutting leads to decreased evapotranspiration and interception from trees and plants. This leads to an increase in groundwater recharge and in the end larger runoff in the stream that drains the areas.

The increased amounts of water in clear-cut areas lead to a raised groundwater table. This connects additional soil layers to the stream. The layers that lie closer to the surface contain a larger concentration of DOC (dissolved organic carbon) and some of the nutrient ions that move more quickly to the stream. This can affect the water quality downstream.

The purpose of the thesis has been to examine the increase in the groundwater table after clear-cut in Balsjö, Västerbotten. The area was clear-cut in March 2006. In the study three different subareas has been used where two were clear-cut. One was totally clear-cut, the second area was clear-cut with a buffer strip left next to the stream and the third area was left unchanged to work as a reference area. The groundwater levels and the discharge in the stream had an exponential relationship. From these relationships different models were put together to generate “new” time series for groundwater levels for 2005, 2007 and 2009.

The study has shown that the relationship between discharge and groundwater level has changed after clear-cut. The groundwater level came closer to the ground surface, which means that for the same discharge the groundwater level was closer to the ground surface after clear-cut than before. The biggest difference between 2005 and 2009 was found in the totally clear-cut area. A small change was also noticed in the reference area. The groundwater level and discharge relationship’s effect on groundwater levels and lateral flow, showed an increase elevation of the groundwater table in the soil. The effect of increased discharge with similar soil hydraulic properties showed that the flow was only increased in the amount of water that was drained and not in elevation of the groundwater table in the soil at moderate to high flows, but since low flows were not as low after harvest, there was some increase in the water table during low flow periods.

A conclusion from this study was that clear-cut has an impact on soil structure which leads to an increase in the level of the groundwater table (assuming that the stream channel has not “backed up” and altered the flow relations in the flat, low-lying areas around the stream). The increase in runoff is only responsible for a minor part in the increased groundwater table in clear-cut areas.

Keywords: Groundwater, flow path, clear-cut, groundwater level
Department of Aquatic Sciences and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences

Vallvägen 3, SE-756 51 Uppsala
ISSN 1401-5765

FÖRORD

Det här examensarbetet har utförts på Institutionen för vatten och miljö vid Sveriges lantbruksuniversitet i Uppsala. Ämnesgranskare har varit professor Kevin Bishop och handledare doktorand Mattias Winterdahl båda vid Institutionen för vatten och miljö Sveriges lantbruksuniversitet i Uppsala.

Jag skulle främst vilja tacka Kevin och Mattias för ert engagemang och era synpunkter under arbetets gång. Även ett tack till Rasmus Sörensen, Jakob Schelker och Karin Eklöf som hjälpt med vattenföringsdata, svarat på frågor kring arbetet och som har haft en stor del att mätningarna av både grundvattennivå och vattenföring i Balsjö har blivit av. Tack även till alla andra som under tidigare år varit i Balsjö och samlat in data.

Skulle även vilka tacka Peter Larsson för att du har lyssnat på och diskuterat mina idéer, tack även till Kristina Tattersdill och alla andra på Institutionen för vatten och miljö på Sveriges lantbruksuniversitet för trevligt sällskap under rasterna.

Uppsala Februari 2010

Emil Vikberg

Copyright © Emil Vikberg och Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.

UPTEC W 10 005, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2010

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Skogsavverkningens påverkan på grundvattnets flödesvägar

Emil Vikberg

Skogsbruk har varit en viktig del i samhället ända sedan medeltiden då man använde skogen till att bygga hus, värma upp bostäder samt till båtbyggande. Sedan den industriella revolutionen tog fart under 1800-talet har skogen börjat värderas som en viktig naturtillgång. Allteftersom sågverk och pappersbruk började anläggas utefter den svenska kusten har skogsbruket blivit alltmer kommersiellt. Runt sekelskiftet började man använda trakthyggesbruk för att främja återväxten. Trakthyggesbruk innebär att ett skogsbestånd har samma ålder (alla träd är lika gamla). När skogen sedan avverkas kommer ett stort område att kalläggas. De stora kalhyggarna som fanns under mitten av 1900-talet har på senare år minskat i storlek. Ett genomsnittligt hygge är idag ca 6 ha stort i norra Sverige och ca 4 ha stort i de södra delarna.

När den industriella revolutionens alla fabriker och nya teknologi växte fram främst under början av 1900-talet blev en stor del av våra sjöar och vattendrag påverkade av utsläpp från samhälle och industri. Främst genom förurning från industrier genom surt nedfall och övergödning till följd av ökade utsläpp av näringsämnen från jordbruksområden. Då våra naturområden redan är hårt belastade kan en ökning av näringsämnen från skogsområdena få negativa konsekvenser i de svenska akvatiska ekosystemen.

Tidigare studier kring skogsavverkningens påverkan på vattenkvalitet i de vattendrag som avvattnar avverkade områden har visat på att halten av DOC (löst organiskt kol) kan öka och att det sker ett ökat utflöde av näringsämnen. Detta kommer som en följd av att markskikt som ligger närmare markytan kommer i kontakt med den höjda grundvattenytan och som sedan kan transportera dessa ämnen ut till vattendragen. Markskikt som ligger närmare markytan innehåller en högre halt av DOC och näringsämnen till följd av nedbrytning av det organiska material som finns i de översta markskikten.

Denna studie har undersökt vilka vägar som grundvattnet tar i närheten av ett vattendrag efter att ett område kring Balsjö i Västerbotten har avverkats. För att kunna jämföra grundvattennivåerna efter avverkningen har en jämförande studie gjorts. Tre olika delområden användes varav ett delområde lämnades ostört, i det andra lämnades det kvar en buffertzona närmast bäcken och i det tredje avverkades hela avrinningsområdet. De båda avverkade delområdena avverkades under mars månad 2006 och markberedes och såddes under sommaren 2008.

För att kunna studera grundvattennivåerna användes ett exponentiellt samband mellan grundvattennivå och flödet i bäcken. Detta samband användes för att ta fram modeller som beskrev sambandet under 2005 och 2009. Mätningar av grundvattennivå och vattenföring startade under 2005 och pågick till 2009. Detta för att kunna jämföra förhållandena före och

efter avverkningen i alla områdena. Det gjordes både manuella och kontinuerliga mätningar under hela perioden.

Studien visade att avverkningen hade en effekt på sambandet mellan vattenföringen och grundvattennivån efter avverkningen. Detta visade sig genom att grundvattenytan låg högre upp i markprofilen efter avverkningen än före avverkningen. Det har även visat sig vara en skillnad mellan det kalavverkade området och området där det lämnades en buffertzona närmast bäcken. Effekten av avverkningen på grundvattennivåerna var störst i det kalavverkade området där grundvattenytan höjdes med 10-30 cm medan höjningen var något mindre i buffertzonsområdet.

För att kunna säkerställa vilka orsakerna var till höjningen av grundvattenytan användes olika metoder. I den första metoden testades vilken effekt som sambandet mellan grundvattennivån och vattenföringen hade på grundvattennivåerna och i den andra metoden testades den ökade avrinningens effekt på grundvattennivåerna. Resultatet som gavs var att förändringen i sambandet mellan grundvattennivån och vattenföringen hade en större påverkan på grundvattennivåerna än vad den ökade vattenföringen hade. Volymen vatten som hade transporterats genom olika markskikt hade även ökat efter avverkningen. Största orsaken till den förändrade grundvattensituationen var förändringen av sambandet mellan grundvattennivån och vattenföringen. Förändringen gav en förskjutning av grundvattenflödet uppåt i marken.

Slutsatserna som kan dras utifrån resultatet var att det har skett en förändring i marken efter en avverkning vilket medförde en höjd grundvattennivå. Ökningen i avrinningen för de avverkade områdena hade en mindre betydelse i höjningen av grundvattennivån än vad sambandet mellan grundvattennivån och vattenföringen hade.

Innehållsförteckning

REFERAT	iii
ABSTRACT	iv
FÖRORD.....	v
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	vi
1. INLEDNING.....	1
2. TEORI.....	2
2.1. GRUNDEVATTENBILDNING.....	2
2.2. GRUNDEVATTENFLÖDE	2
2.3. TRANSMISSIVITY FEEDBACK.....	3
2.4. SLUTAVVERKNING OCH HYDROLOGI	3
3. BAKGRUND.....	4
3.1. UNDERSÖKNINGSOMRÅDET	4
3.1.1. Mätutrustning.....	5
3.1.2. Klimat	8
3.1.3. Avverkning	9
3.1.4. Markberedning.....	10
3.2. AVRINNING EFTER AVVERKNING.....	10
4. METODER	10
4.1. JUSTERING AV UPPMÄTTA VÄRDEN	11
4.2. KALIBRERING	12
4.3. VATTENFÖRING	14
4.4. GRUNDEVATTENMODELLER	15
4.4.1. Statistik	17
4.5. ANTALET MÄTTADE TIMMAR PÅ OLIKA NIVÅER I MARKEN	18
4.6. FRAMRUNNEN VOLYM VATTEN I MARKEN	18
4.7. ORSAKER TILL SKILLNADER I GRUNDEVATTENSITUATIONEN.....	20
5. RESULTAT	21
5.1. FLÖDESDATA	21
5.2. GRUNDEVATTENSITUATIONEN 2005, 2007 OCH 2009.....	22
5.2.1. Referensområdet (Ref).....	22
5.2.2. Buffertzonsområdet (BS)	27
5.2.3. Kalavverkat område (CC)	31

5.3. ORSAKER TILL SKILLNADERNA I GRUNDVATTENSITUATIONEN	34
5.3.1. Referensområde (Ref)	34
5.3.2. Buffertzonsområde (BS)	36
5.3.3. Kalavverkat område (CC)	38
6. DISKUSSION	41
6.1. DATABEARBETNING	41
6.2. GRUNDVATTENMODELLER	43
6.3. GRUNDVATTENYTANSLÄGE I MARKEN	44
6.4. FRAMRUNNEN VOLYM GRUNDVATTEN	46
7. SLUTSATSER.....	47
8. LITTERATURFÖRTECKNING	48
BILAGA A. Kalibreringsdiagram	I
BILAGA B. Kalibreringsfunktioner	III
BILAGA C. Grundvattemodeller	IV
BILAGA D. Grundvattenmodells funktioner.....	VI
BILAGA E. Grundvattenytans läge och framrunnen volym grundvatten, Årsvis.....	VII
BILAGA F. Sammanställning av resultat för 2005, 2007 och 2009.....	XII
BILAGA G. Grundvattenytans läge och framrunnen volym grundvatten, Metoder...XIII	
BILAGA H. Sammanställning av resultat för metoderna.....	XXIV
BILAGA I. Tidsserier	XXV

1. INLEDNING

I Sverige består närmare 55 % av landarealen av skogsbeväxt mark där större delen är produktiv skogsmark, d.v.s. skog som kan producera virke eller massaved. I Sverige är det vanligaste skogsbruket trakthyggesbruk, vilket innebär att ett skogsbestånd har samma ålder (Ring m.fl. 2008). Detta gör att det finns stora områden i Sverige som är avverkade och som nyligen har varit avverkade. Det kan därför vara intressant att undersöka hur dessa områden påverkas både hydrologiskt och kemiskt när skogen avverkas.

Studier med den stabila isotopen syre¹⁸ visade att större delen av ökningen i vattenföring i vattendrag vid nederbördstillfällen kommer från grundvattnet och inte genom ytavrinning (Rodhe, 1989). När ett område avverkas kommer en mindre del av den nederbörd som faller att evapotranspireras och interceptionen kommer att minska, vilket leder till att grundvattenbildningen och den specifika avrinningen kommer att öka. Studier av vattenföringen efter avverkning vid Balsjö i Västerbotten visar att avrinningen ökade med ca 35 % i förhållande till ett oavverkat område (Sörensen, 2009).

Det finns ett samband mellan grundvattennivå och vattenföring i vattendrag som kan förklaras med ”transmissivity feedback” teorin. Teorin bygger på att den hydrauliska konduktiviteten minskar med djupet för moränjordar, vilket innebär att en liten höjning av grundvattennivån vid nivåer djupare i marken leder till en liten förändring i vattenföring medan en liten förändring av grundvattennivån vid nivåer närmare markytan leder till en stor ökning i vattenföringen (Bishop, 1991).

Den höjda grundvattennivån i marken efter avverkning (Lundin, 1979) kommer att leda till en ökad vattenföring som i vissa fall kan försämra vattenkvalitén i de vattendrag och sjöar som ligger nedströms de avverkade områdena. Höjningen av grundvattennivå kopplar samman markskikt som har en högre halt av DOC vilket kan medföra att halten DOC i vattendrag ökar under perioden efter avverkning (Laudon m.fl. 2009).

Tidigare studier som har gjorts i ämnet kring grundvattnets flödesvägar kring Balsjö visade att det skedde en höjning av grundvattenytan efter avverkningen. Dessa resultat byggde på det observerade teoretiska sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring före avverkningen. Den beräknade höjningen av grundvattenytan tog inte hänsyn till en eventuell förändring i detta samband (Haglund, 2009).

I området kring Balsjö fanns det tre olika delområden som under undersökningsperioden har behandlats olika enligt metoden parvis jämföring mellan avrinningsområden. Två av delområdena hade avverkats medan det tredje lämnades orört och fungerade som ett referensområde. Tre olika tidsperioder användes för att undersöka effekterna. Den första var då områdena fortfarande var oavverkade och den sträckte sig från slutet av maj till början av oktober 2005. Den andra var för en period under växtsäsongen 2007 då två av områdena hade blivit avverkade men innan någon markberedning hade utförts. Den tredje perioden var från maj till slutet av september 2009 efter det att markberedningen hade utförts.

Syftet med den här studien var att undersöka vilken effekt som avverkningen har på grundvattnets flödesvägar vid den ökade grundvattenbildningen kring Balsjö i Västerbottens län. För detta utnyttjades framtagna samband mellan grundvattennivån och vattenföringen både före och efter avverkning. Vidare var syftet att undersöka vilka orsakerna var till skillnaderna i grundvattenytans läge och mängden framrunnet vatten åren efter avverkningen.

2. TEORI

2.1. GRUNDVATTENBILDNING

Vatten som infiltrerar marken vid regniga perioder kommer att bidra till grundvattenbildningen och grundvattenflödet i ett område. Eftersom vattenpartiklarna infiltrerar med en hastighet av några centimeter per timme kommer dessa inte att bidra till det ökande utflödet av grundvatten till vattendragen (Grip & Rodhe, 2003). De kommer istället att bidra med ett ökat tryck som i sig leder till det ökande utflödet. Inströmningsområdet återfinns i de högre belägna delarna av ett avrinningsområde. Allt det vatten som infiltrerar här kommer inte att bidra till fullt till vattenföringen eftersom växter kommer att ta upp en del av vattnet. Utströmningsområdet återfinns i närheten av vattendrag och bidrar till fullt till vattenföringen (Grip & Rodhe, 2003, Rodhe, 1989).

Det finns ett samband mellan grundvattennivå och vattenföring i ett vattendrag, vilket innebär att en höjning av grundvattennivån ger ett ökat flöde i vattendraget (Bishop, 1991). I en studie av Seibert m.fl. (2003) fann man att ju längre från vattendraget desto svagare blir sambandet. Upp till ca 35 m från vattendraget fann de ett starkt samband mellan grundvattennivå och vattenföring medan det på avstånd över 60 m var ett svagare samband. Detta innebär att grundvattenytan kan stiga på avstånd över 60 m samtidigt som flödet i vattendraget sjunker vilket innebär att det finns en fördröjningseffekt.

2.2. GRUNDVATTENFLÖDE

Grundvattenflödet drivs av gravitation och tryckskillnader. Det finns tre olika hastigheter när man pratar om grundvattenströmning. Den första är den s.k. Darcyhastigheten vilken hänvisar till vattnets hastighet genom en tvärsnittsarea (m^3/s). Den ”drivande” kraften här är grundvattenytans lutning (Grip & Rodhe, 2003).

Det vatten som flödar genom jordmatrisen kan beräknas med hjälp av Darcys lag

$$\frac{Q}{A} = -K * \left(\frac{\Delta h}{\Delta l}\right) \quad (1)$$

Där Q/A är flödet genom tvärsnittsarean ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2 = \text{m/s}$), K den hydrauliska konduktiviteten (m/s) och $\frac{\Delta h}{\Delta l}$ är grundvattenytans lutning.

Den andra hastigheten som är relevant är en tryckfortplantningshastighet vilken är mycket snabbare än Darcyhastigheten. Som nämnts tidigare är det ökade trycket som leder till att det vid regn blir ett ökat utflöde i utströmningsområdet även fast det normalt tar lång tid för de vattenpartiklar som har infiltrerats i marken att nå ned till grundvattenytan (Grip & Rodhe, 2003).

Den tredje hastigheten är vattenpartikelns hastighet, vilken är mycket långsammare än tryckfortplantningshastigheten och beskriver vilken hastighet vattenpartikeln har i marken (Grip & Rodhe, 2003).

Grundvattenutflödet till vattendraget kan beskrivas som det laterala flödet, vilket är ett flöde parallellt med markytan i den mättade zonen där den drivande kraften är grundvattenytans lutning (Seibert m.fl. 2009).

2.3. TRANSMISSIVITY FEEDBACK

I hydrologiska studier i svensk skogsmark har man funnit ett samband mellan vattenföring i vattendrag och grundvattennivån. Sambandet kan beskrivas som en exponentialfunktion. Den hydrauliska konduktiviteten ökar ju närmare markytan man kommer. Anledningen är uppluckring av jorden vid tjäle, mikrobiell aktivitet och tillväxt av rötter (Bishop, 1991). När grundvattennivån stiger till följd av längre nederbördsperioder kommer detta att leda till ett ökat grundvattenflöde till vattendraget och vattenföringen ökar.

Den hypotes som beskriver detta samband kallas för ”Transmissivity feedback”-hypotesen. Innebörden av denna är att när grundvattenytan stiger till följd av infiltration av nederbörd kommer den mättade zonen (grundvattenzonen) i kontakt med ovanliggande marklager som har en högre hydraulisk konduktivitet. Den ökande konduktiviteten leder till att en större volym grundvatten kan transporteras ut till vattendraget och vattenföringen ökar. När grundvattenytan nått upp till en viss nivå kommer grundvattenzonens kapacitet att transportera vatten att vara lika med grundvattenflödet uppifrån, vilket gör att höjningen av grundvattennivån stannar av. Motsvarande sker då grundvattenflödet uppifrån slutningen minskar vilket leder till att grundvattennivån sjunker. Ju mer vatten som dräneras desto mer sjunker ytan. Eftersom konduktiviteten är lägre i de djupare lagren kommer en mindre mängd grundvatten att dräneras per tidsenhet vid låga grundvattennivåer än vad det gör vid höga nivåer (Bishop, 1991). Enligt ”Transmissivity feedback” teorin innebär det att en liten höjning av grundvattennivån vid låga flöden kommer att leda till en större ökning av vattenföring i vattendraget än vid höga flöden.

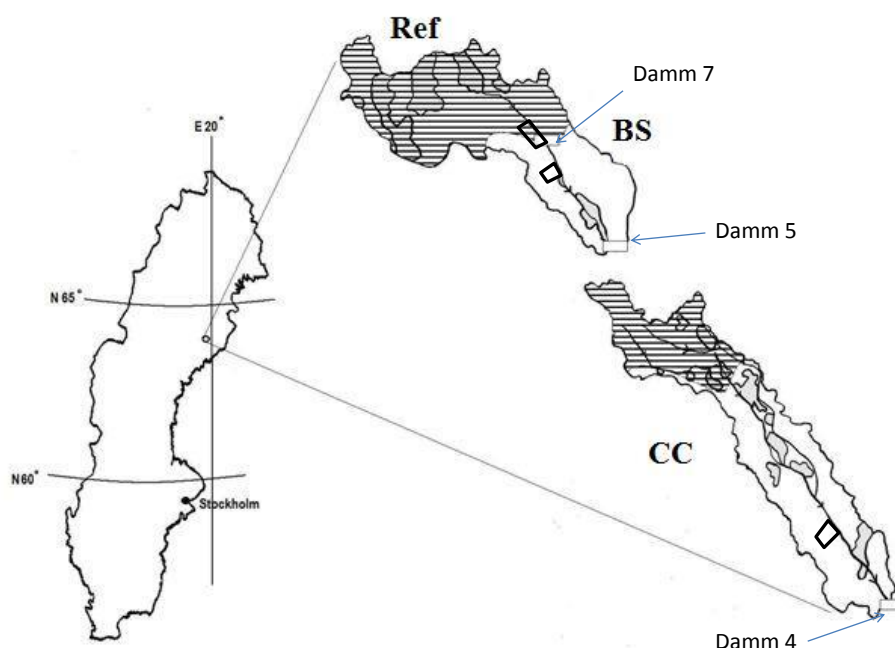
2.4. SLUTAVVERKNING OCH HYDROLOGI

Efter avverkning kommer evapotranspirationen från växter och interceptionen att minska, vilket leder till att en större mängd vatten kommer att infiltreras och markvattenhalten och grundvattenbildningen ökar. Följderna av den ökade grundvattenbildningen är att grundvattenytan kommer att höjas, mer grundvatten kommer att transporteras från högre belägna delar och det i sin tur gör att utströmningsområdenas yta kommer att öka (Lundin, 1979). Effekten av avverkningen kan vara påtaglig i ungefär 10 år, tills det att marken har återkoloniserats av nya växter och träd som kan ta upp en större mängd grundvatten (Ring m.fl 2008). Enligt Monteith m.fl. (2006) förses vattendrag med en större andel djupt grundvatten om marken är beväxt av skog än om den är avverkad.

3. BAKGRUND

3.1. UNDERSÖKNINGSOMRÅDET

Det undersökta området ligger 60 km väster om Umeå i Västerbottens län i närheten av byn Balsjö (64° 02' N, 18° 57' E) se Figur 1. Studier som har bedrivs i området har fokuserat på avverkningens påverkan på vattentransport samt urlakning av DOC, kväve, kvicksilver och andra kemiska ämnen (Sörensen, 2009).



Figur 1. Balsjös position i Sverige, med utritade vattenföringsdammar för de olika delområdena och positionen för transekterna i delområdena. (Sörensen 2009)

Vegetationen består främst av tall (*Pinus sylvestris*) i de högre belägna delarna och gran (*Picea abies*) i de lägre delarna. Höjden över havet i området varierar från ca 250 till 320 meter. Berggrunden består av pegmatit, aplit och aplitisk granit (Sörensen, 2009). Jordarten är främst torv i de lägre belägna delarna och morän i de högre delarna samt en del isälvseroderat material. Det finns även en del berggrund som står i dagen (SGU, 2009).

Det aktuella området delades in i tre olika delområden och dessa behandlades på olika sätt under åren. I två av delområdena hade skogen i avrinningsområdet avverkats. Detta skedde i den södra delen av det norra området och i hela det södra området (Figur 1). Den södra delen av det norra delområdet kommer att betecknas som buffertzonsområdet (BS). I det området hade en buffertzona med träd lämnats kvar närmast bäcken. I det södra området hade hela delområdet kalavverkats (CC). I både de avverkade områdena hade de våtmarker som finns i delområdena lämnats orörda. Området norr om BS-området lämnades orört som referensområde (Ref). Den totala arean var 82 ha och var fördelad enligt följande BS 14,2 ha, CC 45 ha och Ref 22,8 ha (Schelker muntligen, 2009).

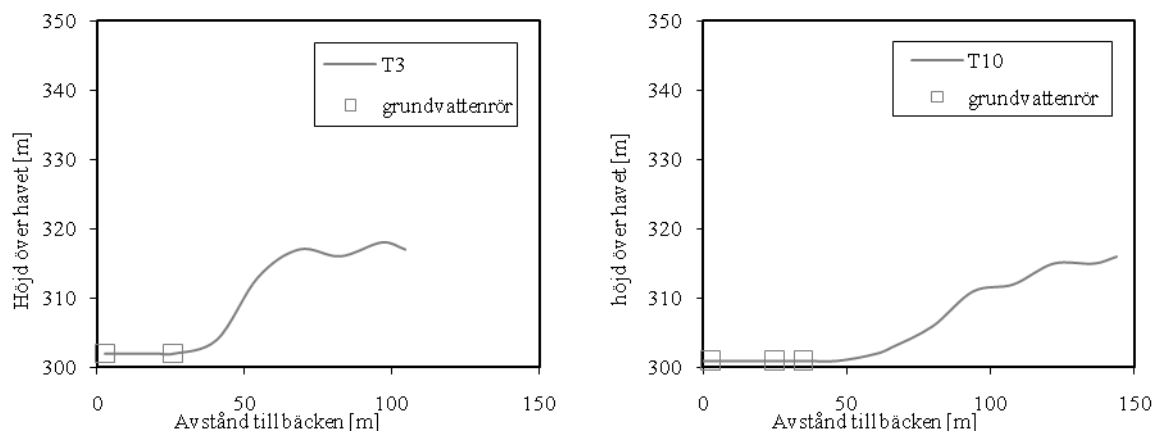
För att studera effekterna efter avverkning av området användes en referensperiod som sträckte sig från september 2004 och ca 18 månader framåt fram till dess att avverkningen började. Avverkningen av CC och BS skedde under mars månad 2006, då det var ett tjockt snötäcke i området, och de markbereddes och såddes under sommaren 2008. Avverkningen utfördes av skogsägaren Holmen skog (www.holmen.se) enligt de normala riktlinjerna för avverkning (Högbom, 2009).

3.1.1. Mätutrustning

På tre ställen nedströms delområdena hade 90° triangulära överfall installerats för att mäta vattenföringen i de vattendrag som avvattnade de olika avrinningsområdena. Dessa var placerade vid damm 4,5 och 7 i Figur 1.

Under 2005 installerades grundvattenrör i 29 transekter i området. Detta gjordes för att kunna övervaka grundvattennivåerna i anslutning till vattendragen. Både manuella och kontinuerliga grundvattennivåvärden uppmättes under åren 2005 till 2009. De kontinuerliga värdena registrerades för varje timme med Tru-Track loggrar (Intech instruments LTD., 2005). De manuella mätningarna utfördes med ett graderat plaströr och till vilken en plastslang var fastsatt. Mätningen gjordes genom att observatören blåste in i slangen tills vattnet i grundvattenröret ”bubblade” då nivån på den graderade skalan lästes av. Den nivån som uppmättes var avståndet mellan grundvattenytan och grundvattenrörets överkant.

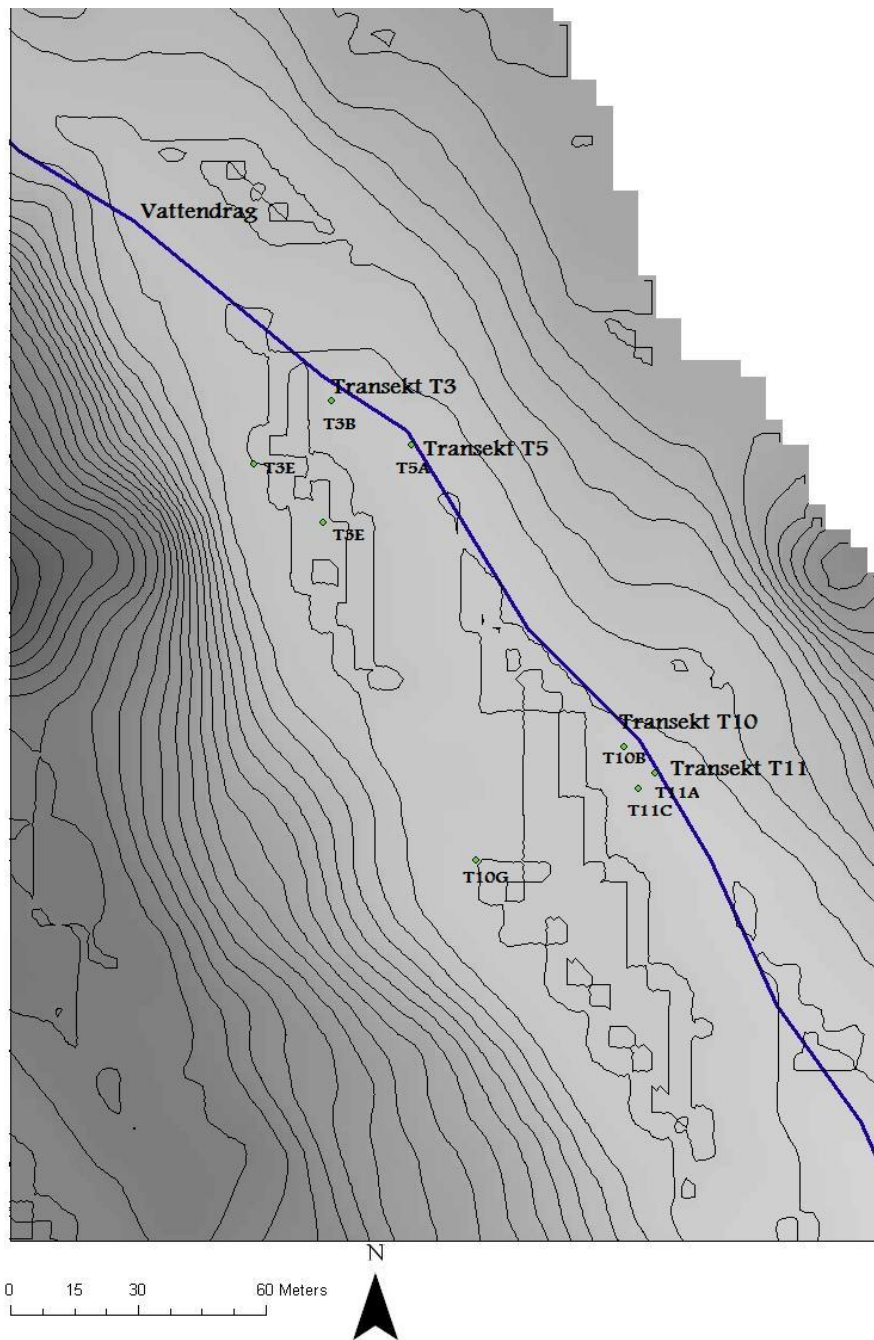
I denna studie kom sex av transekterna att användas, två för varje delområde (BC, CC och Ref) sammantaget innehållande nivådata från 13 grundvattenrör. Varje transekt innehöll ett antal grundvattenrör på olika avstånd från vattendraget. Transekterna var belägna parallellt med det förmodade laterala flödet. Grundvattenrören i transekterna var märkta med bokstäverna A till G. Grundvattenrörens avstånd till bäcken ges i Tabell 1, där A ligger närmast och G längst ifrån vattendraget. Grundvattenrören i både referens- och buffertzonsområdet låg på den västra sidan av bäcken (Figur 3). Området väster om bäcken består av en torvtäckt del i det flacka området närmast vattendraget, medan det längre från bäcken övergår i mineraljord. Östra sidan av bäcken ligger precis i nederkant av sluttningen (Figur 2). Transekterna T3 och T5 låg i referensområdet, T10 och T11 i buffertzonsområdet och T16 och T17 i det kalavverkade området.



Figur 2. Grundvattenrörens placering för transekterna T3 och T10 i förhållande till sluttning och det flacka nedre området (Haglund, 2009).

Tabell 1. Medelavståndet mellan grundvattenrör och vattendrag.

Rörbenämning	Avstånd (m)
A	>0,2
B	2,6
C	6,2
D	17,4
E	24,3
F	32
G	47



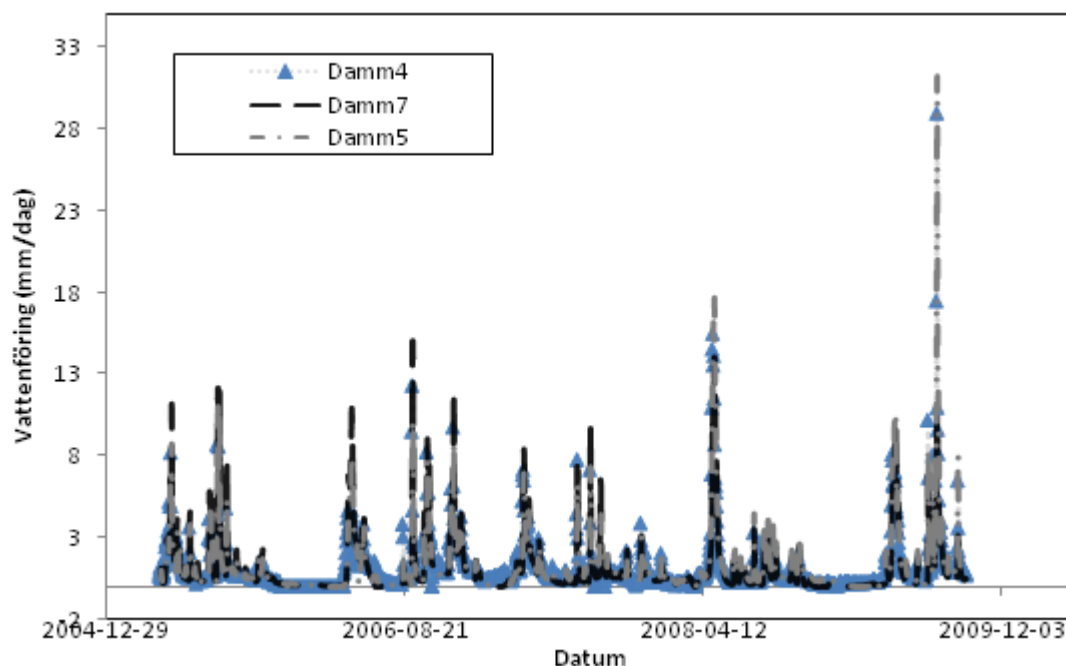
Figur 3. Figur över transekterna T3, T5, T10 och T11 position i förhållande till damm 7. Buffertzoon kring vattendraget i BS-området. (ArcGis)



Figur 4. Transekterna T16 och T17 position i förhållande till vattendraget (ekvidistans 1 m). (ArcGis)

3.1.2. Klimat

Årsmedelnederbörden i området var 554 mm och medeltemperaturen $0,6^{\circ}$ för perioden 1961 till 1991 (Alexandersson m.fl.) 1991). Den specifika avrinningen var mycket större för de avverkade områdena under 2009 än 2005 jämfört med referensområdet under växtperioden maj-oktober. I Tabell 2 visas den specifika avrinningen för åren 2005, 2007 och 2009. I Figur 5 visas vattenföringen för de olika dammarna för hela tidsserien 2005-2009. Värt att notera är den vattenföringstopp som kan ses 2009 vilken är större än vårfloden. Det kan även ses att avrinningen för åren efter avverkning var högre än året före avverkning. 2005 var året före avverkningen, 2007 var året efter avverkningen men före markberedning och 2009 var året efter markberedning av de avverkade områdena.



Figur 5. Vattenföringen (mm/dag) för alla vattenföringsdammar i Balsjö för perioden april 2005- september 2009.

Tabell 2. Den specifika avrinningen (mm) för perioden maj-oktober för de aktuella åren.

År	Damm 4 (mm)	Damm 5 (mm)	Damm 7 (mm)
2005	255	267	291
2007	217	234	225
2009	388	411	291

3.1.3. Avverkning

Vid avverkning av ett så kallat trakthyggesbruk (samma ålder på skogsbeståndet) som är den vanligaste brukningen av skog i Sverige avverkas i stort sett alla träd inom ett område och ersätts sedan med en ny generation skog. Det finns två olika metoder vid avverkning. Den traditionella där grenar och toppar lämnas kvar, och den andra som kallas GROT (GROT= GRenar Och Toppar) där grenar och toppar tas ut för energianvändning. Delområdena i Balsjö avverkades enligt den traditionella metoden då grenar och toppar lämnades kvar (Ring m.fl. 2008).

3.1.4. Markberedning

För att underlätta för de nya bestånden markbereds ofta områden som har avverkats. Markberedning innebär att marken harvas vilket gör att mårskiktet vänds och täcks med mineraljord (Ring m.fl. 2008). Detta görs för att öka möjligheten för förnygring genom mindre konkurrens från annan vegetation, jämnare fuktighet, högre marktemperatur och högre näringstillgång (Sandberg, 2003)

3.2. AVRINNING EFTER AVVERKNING

Under perioden augusti 2006 till mars 2008 hade avrinningen i de avverkade områdena (CC,BS) ökat med ca 35 % i förhållande till referensområdet (Ref). Förhållandet mellan områdena före avverkningen hade bestämts för perioden september 2004 till mars 2006. Den specifika avrinningen före avverkning (1 september 2004 -1 april 2005) var 525 mm för referensområdet, medan den ökade för perioden efter avverkningen med 36 % (254 mm) för det kalavverkade området och 34 % (253 mm) för buffertzonsområdet (Sörensen, 2009). Den största ökningen skedde vid låga flöden under växtsäsongen, 58 % och 99 % för CC respektive BS för flöden under 1 mm/dag (Sörensen, 2009).

4. METODER

Arbets sättet kan delas in i sju delar. Använd data har varit kontinuerligt registrerade timvärden av vattenståndet i grundvattenrören, manuella mätningar av vattenståndet i grundvattenrören, kontinuerligt registrerade timvärden av vattenståndet och manuella mätningar av vattenföringen vid vattenföringsdammarna.

1. I den första delen korrigerades de uppmätta värdena på vattenståndet i grundvattenrören så att de beskrev grundvattennivån under markytan. Både de manuellt uppmätta värden och de av loggern registrerade värden korrigerades.
2. De korrigerade värden på grundvattennivån som loggern registrerat kalibrerades sedan mot de korrigerade manuellt uppmätta grundvattennivå värdena.
3. Vattenföringen beräknades sedan från en avbördningskurva.
4. Därefter togs modeller fram som beskrev sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring för 2005 och 2009 för varje grundvattenrör. Modellerna beskrev grundvattennivån som en funktion av vattenföringen.
5. Modellerna användes sedan tillsammans med den beräknade vattenföringen för 2005, 2007 och 2009 för att generera en ”ny” grundvattennivåtidsserie. Tidsserien analyserades sedan med avseende på hur länge en nivå i marken varit mättad. Resultatet visades i diagram med hur lång tid olika marknivåer varit mättade under 2005, 2007 och 2009.
6. De framtagna modellerna inverterades så att de beskrev vattenföringen som en funktion av grundvattennivån. Därefter beräknades hur stor volym grundvatten som har runnit fram genom en tvärsnittsarea i marken. Resultaten som genererades i föregående steg användes som indata till de inverterade modellerna. Resultaten visades i diagram över hur stor volym grundvatten som runnit igenom en nivå i marken under 2005, 2007 och 2009.

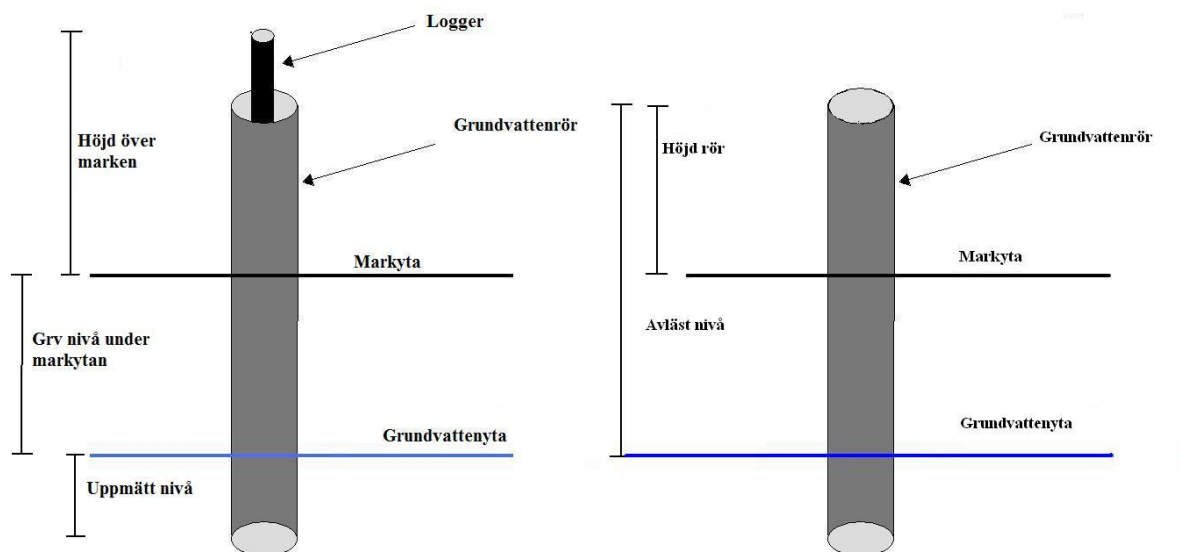
7. För att kontrollera vad som låg bakom skillnaderna i grundvattennivå och framrunnen volym grundvatten mellan åren 2005, 2007 och 2009 användes två olika metoder: Den första tog hänsyn till skillnaderna i sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring. Detta innebar att modellerna för 2005 och 2009 användes tillsammans med samma vattenföring (Referensområde 2009). Den andra tog hänsyn till skillnaderna i vattenföring och innebar att samma modell (2009) användes med olika vattenföring. Vattenföringen för respektive område användes för efter avverkning. Som vattenföring före avverkning användes 2009 års vattenföring för Referensområde.

4.1. JUSTERING AV UPPMÄTTA VÄRDEN

Första steget var att kontrollera de tidsserier som loggarna gav för att se om det under någon period fanns några avvikande värden. Därefter gjordes en justering av både loggervärden och de manuella värdena för grundvattennivån under markytan. Loggern var en 131 cm lång stav som var placerad på grundvattenrörets botten. Loggern registrerade vattennivån ovanför grundvattenrörets botten. Till detta steg användes loggers höjd över marken och den av loggern uppmätta vattennivån. Samtliga värden angavs i millimeter. Loggers höjd över marken bestämdes genom att först mäta grundvattenrörets överkant höjd över marken och därefter loggers placering i förhållande till grundvattenrörets överkant dessa termer summerades till höjd över marken. Justeringen av grundvattennivån med de uppmätta värdena kan ses i ekvation 2

$$h_{Grv\ nivå,log} = h_{Uppmätt\ nivå,logger} - 131\ (cm) - h_{Höjd\ över\ marken} \quad (2)$$

131(cm) var loggerstavens längd i centimeter. I Figur 6 nedan visas hur höjderna uppmättes i förhållande till grundvattenröret, alla mätningar gjordes i centimeter förutom den av loggern uppmätta vattennivån som angavs i millimeter.



Figur 6. Den vänstra figuren visar förklaring till de avstånd som användes vid justering av loggers uppmätta värden. Den högra figuren visar förklaring till de avstånd som användes justering av de manuellt uppmätta grundvattennivåerna.

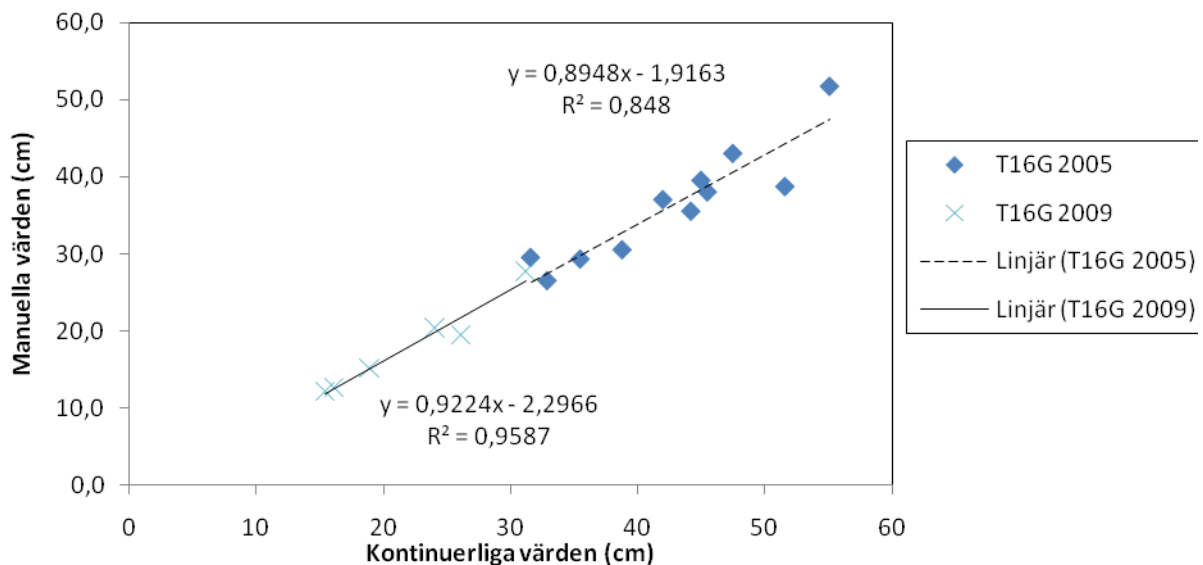
För justering av de manuellt uppmätta värdena användes enbart grundvattenrörets höjd över marken samt den manuellt uppmätta grundvattennivån enligt ekvation 3.

$$h_{Grv\text{ nivå},man} = h_{rör} - h_{Avläst\text{ nivå}} \quad (3)$$

Där $h_{Avläst\text{ nivå}}$ var den manuellt uppmätta grundvattennivån och $h_{rör}$ var grundvattenrörets höjd över markytan. I Figur 6 ses de uppmätta avstånden för justering av de manuella mätningarna.

4.2. KALIBRERING

För att kunna eliminera eventuella systematiska mätfel kalibrerades loggers tidserie mot de manuellt korrigerade uppmätta grundvattennivåerna för varje grundvattenrör. Genom att i ett diagram plotta de manuellt uppmätta grundvattennivåerna och de korrigerade registrerade loggervärdena under markytan för samma tidpunkter (Figur 7), kunde en kalibreringsfunktion mellan loggervärdena och de manuellt uppmätta värdena tas fram. Detta gjordes både för perioden före avverkning (2005) och för perioden efter avverkningen (2009) för varje grundvattenrör. Anledningen till att inte 2007 års tidsserie kalibrerades var att det fanns för få manuella mätningar vilket skulle ha gjort kalibreringen osäker.



Figur 7. Kalibrering mellan de kontinuerliga och manuellt mätvärdena för grundvattennivån under markytan för grundvattenrör T16G. Axlarna anger djupet under markytan.

Kalibreringsfunktionerna för respektive år användes sedan för att justera tidsserierna (Ekv. 4)

$$h_{grv,kal} = -\left(B * \left(\frac{h_{logger}}{10}\right) - C\right) \quad (4)$$

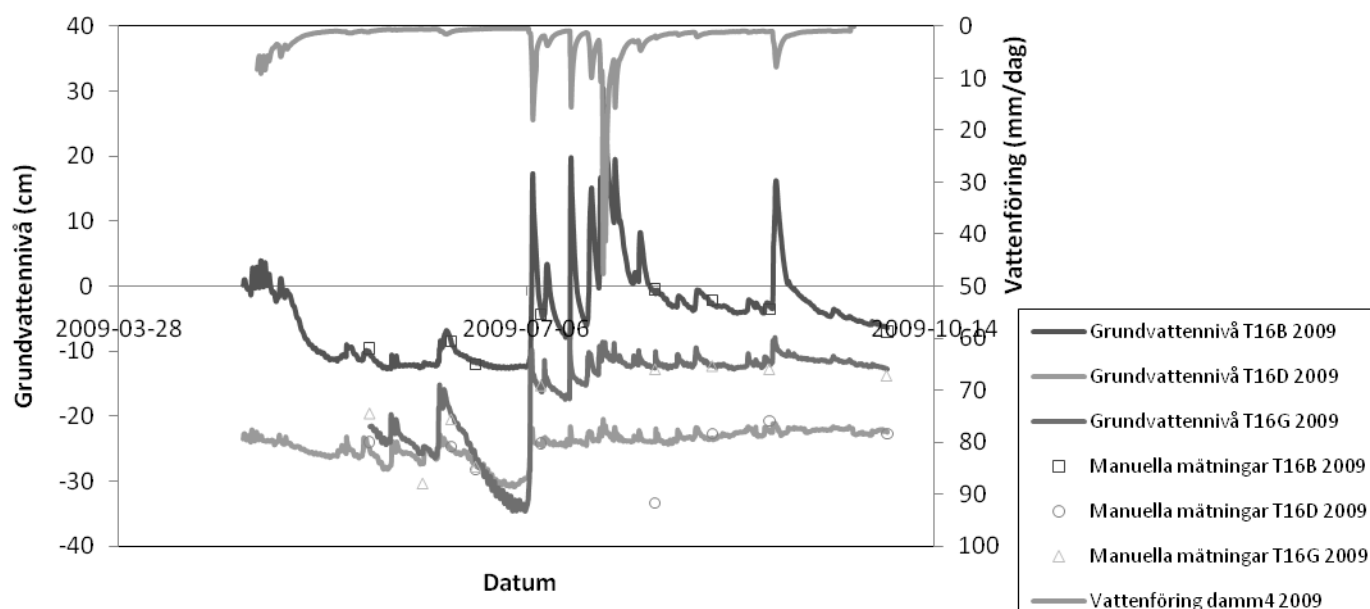
Där B och C var parametrarna som gavs från kalibreringsfunktionen, h_{logger} var loggers uppmätta värde på grundvattennivån i mm och $h_{grv,kal}$ var den nya kalibrerade grundvattennivån. Enheten vid kalibreringen var centimeter därför dividerades h_{logger} med tio. Markytan sattes som nollinje och för att grundvattennivån skulle ange avståndet från

markytan sattes ett minustecken framför högerledet. Kalibreringsfunktionernas korrelationskoefficienter (R^2) kan ses i

Tabell 3. Kalibreringsdiagrammen och kalibreringsfunktionerna för varje grundvattenrör och år bifogas i Bilaga A och B. För att säkerställa att kalibreringen gav ett acceptabelt resultat plottades de nya genererade tidsserierna tillsammans med de manuellt uppmätta värdena på grundvattennivån (Figur 8). Resterande tidsserier för alla transekter och år bifogas i Bilaga I.

Tabell 3. Kalibreringsfunktionernas korrelationskoefficient (R^2).

Rör	2005	2009
T3B	0,841	0,697
T3E	0,619	0,987
T5A	0,968	0,997
T5E	0,860	0,998
T10B	0,976	0,965
T10G	0,603	0,883
T11A	0,721	0,982
T11C	0,730	0,939
T16B	0,959	0,982
T16D	0,782	0,890
T16G	0,848	0,959
T17A	0,832	0,997
T17C	0,683	0,699



Figur 8. Tidsserier över de automatiskt uppmätta grundvattennivåerna med de manuellt uppmätta grundvattennivåerna inlagda för transekt T16 i CC-området för 2009.

4.3. VATTENFÖRING

Vattenföringen angavs i specifik avrinning, d.v.s. vattenföring per ytenhet av avrinningsområdet. Anledningen till detta var för att i senare beräkningar kunna jämföra olika områden med olika ytareor. Vattenföringen beräknades med Ekvation 5 där koefficienterna bestämdes med hjälp av en avbördningskurva (Figur 10) mellan uppmätt vattenhöjd och manuella vattenföringsmätningar (hink- och/eller saltsutspädningmetod) för åren 2004-2009. Vattenståndet i de vattenföringsdammar som anlades för att beräkna vattenföringen loggades kontinuerligt med hjälp av två stycken Tru-Track-loggrar samt en Campbell tryckgivare.

$$Q = a \times h_{\text{vattenstånd}}^b \quad (5)$$



Figur 9. Vattenföringsstation 7. (Foto: Emil Vikberg)

Koefficienterna a och b bestäms genom mätningar av vattenföringen vid olika vattenstånd och $h_{\text{vattenstånd}}$ var vattenståndet över vinkelns spets. Avbördningskoefficienterna kan ses i Tabell 4. Enheten på det ur Ekvation 5 beräknade flödet är l/s och för att beräkna den specifika avrinningen användes Ekvation 6.

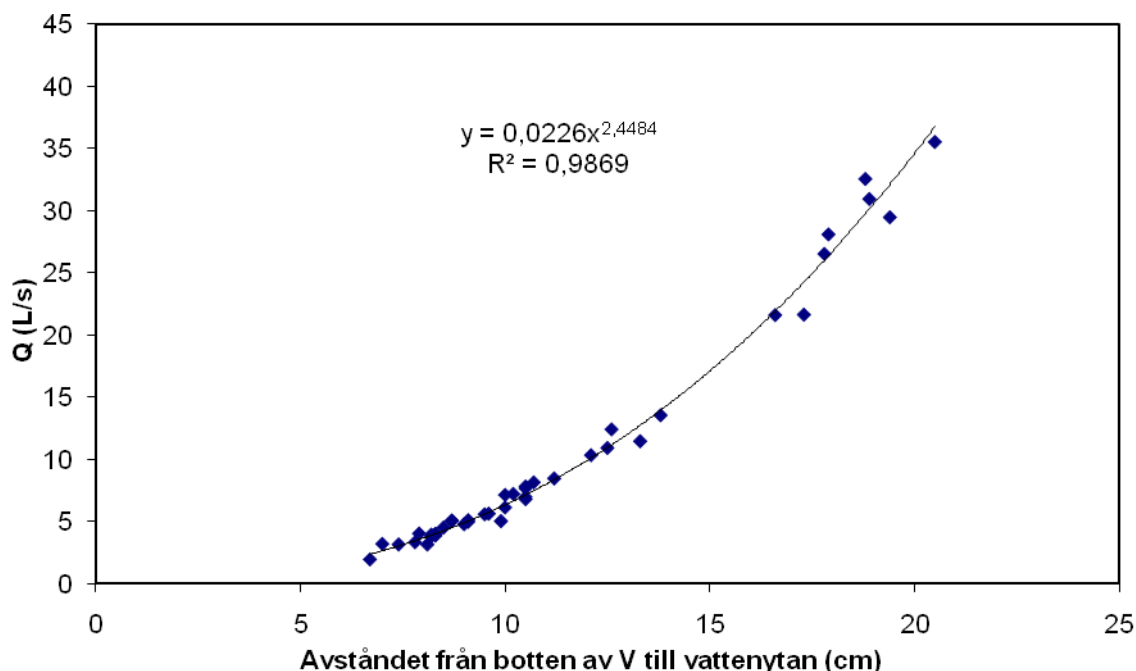
$$q = \frac{Q \times t}{A} \quad (6)$$

Q är vattenföringen i l/s, t är tiden per dag i sekunder och A är avrinningsområdets area vid den aktuella vattenföringsstationen. De olika areorna ges i Tabell 4 (Schelker muntligen, 2009).

Tabell 4. Avbördningskoefficienterna för vattenföringsstationerna samt arean till avrinningsområdena.

Vattenföringsstation	a	b	Area (ha)
Damm4	0,022	2,448	45
Damm5	0,022	2,467	37
Damm7	0,025	2,343	22,8

Vattenföringen för Ref-området (Damm 7) kommer att benämnas QRef-05, -07 eller -09 beroende på vilket år som avses. BS-området (Damm 5) kommer att benämnas QBS-05, -07 eller -09 och CC-området (Damm 4) QCC-05, -07 eller -09.

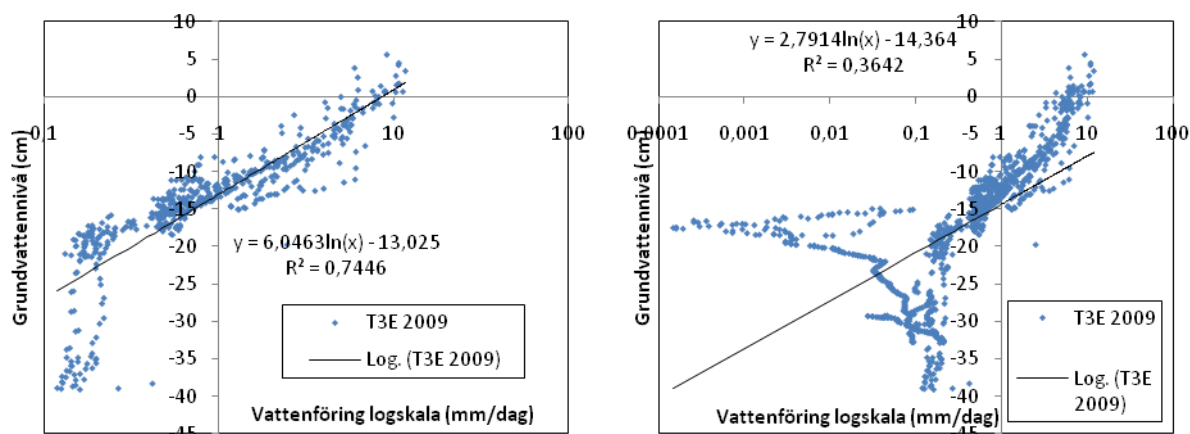


Figur 10. Avbördningskurvan för vattenföringsdamm 4 för åren 2004-2009. (Schelker muntligen, 2009)

4.4. GRUNDTVATTENMODELLER

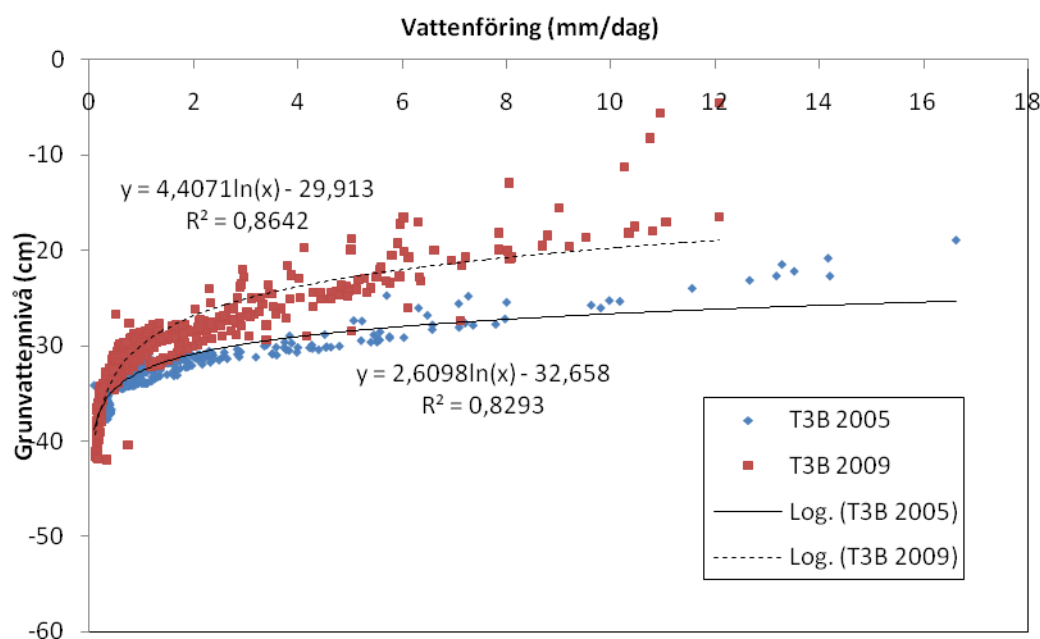
För att kunna ta fram modellerna över hur grundvattennivån samverkar med vattenföringen i det närliggande vattendraget användes sex timmars medelvärde vilket gav fyra värden per dygn för både grundvattennivå och vattenföring. Anledningen till att detta sätt användes var att det inte var någon större skillnad jämfört med timvärden, samt att antalet extremvärden ”outliers” blev färre. I arbetet av Haglund (2009), användes fyra värden per dygn men detta arbetsätt ansågs vara för godtyckligt och skulle kunna leda till bortfall av både höga och låga vattenföringstidpunkter och grundvattennivåer.

Den period som användes för 2005 under hela studien var mellan slutet av maj till oktober eftersom grundvattennivåmätningarna startade i slutet av maj och fortsatte till oktober. För år 2009 var mätningarna av vattenföringen under vintern inte tillförlitliga på grund av isläggning i vattenföringsdammarna. Vintermånadernas inverkan på mätvärdena kan ses i Figur 11, där den vänstra bilden visar sommarmånaderna medan den högra visar vintermånaderna. Sambandet mellan grundvattennivå och vattenföringen ska vara linjärt då vattenföringen är plottad på en logskala. Med dessa diagram i åtanke valdes därför perioden maj till september år 2009. Anledningen till att perioden slutade i september var att det inte fanns en längre tidsserie över vattenföringen.



Figur 11. Den vänstra figuren visar grundvattennivå mot vattenföringen på logskala för maj-september år 2009 för grundvattenrör T3E, den högra figuren visar grundvattennivå mot vattenföringen på logskala för januari-september för grundvattenrör T3E.

Modellerna togs fram genom att i diagram ta fram ett samband mellan grundvattennivå relativt markytan och vattenföringen i bäcken (Gw-Q). För grundvattenröret T5A användes enbart perioden juni-september eftersom området kring grundvattenröret svämmade över i början av maj då bäckfåran inte var tillräckligt bred/djup för att kunna transportera bort vattnet. Modellerna är den logaritmiska anpassning till sambandet mellan de värden på grundvattennivå och vattenföring som plottats upp i diagrammen (Figur 12).



Figur 12. Sambandet mellan vattenföring och grundvattennivå för grundvattenrör T3B i referensområdet.

Nedan ses den generella funktionen till anpassningen (Ekv. 7). I Bilaga C och D redovisas modelldiagrammen och modellfunktionerna för alla grundvattenrör för både 2005 och 2009.

$$h_{grv\ddot{y}ta} = D * \ln(Q) - F \quad (7)$$

Modellen för 2005 kommer att benämnas Gw_Qmodell-05 och modellen för 2009 kommer att benämnas Gw_Qmodell-09 för varje grundvattenrör. I Tabell 5 kan modellfunktionernas korrelationskoefficienter (R^2) ses.

Tabell 5. Modellfunktionernas korrelationskoefficienter (R^2).

Rör	2005	2009
T3B	0,83	0,86
T3E	0,34	0,76
T5A	0,90	0,73
T5E	0,80	0,66
T10B	0,60	0,84
T10G	0,82	0,91
T11A	0,67	0,94
T11C	0,67	0,77
T16B	0,47	0,89
T16D	0,29	0,62
T16G	0,50	0,44
T17A	0,56	0,89
T17C	0,31	0,92

4.4.1. Statistik

För att kontrollera om modellerna skiljde sig signifikant åt före och efter avverkningen användes ett t-test för att kontrollera både lutningen och interceptet (Gradin, 2003) för en linjär regression (vattenföring på log skala) med hypotesen:

H_0 = att lutningen var densamma före och efter avverkningen.

T-värdet beräknades med ekvation 8

$$t = \frac{b_a - b_b}{S_{b_a - b_b}} \quad (8)$$

Där b_a var lutningen före avverkning och b_b var lutningen efter avverkningen och $S_{b_a - b_b}$ var standardavvikelsen.

Därefter kunde t-värdet beräknas för att kontrollera om hypotesen kunde förkastas eller inte. För att kunna förkasta hypotesen H_0 krävdes ett värde på t för ca 1000 frihetsgrader och en signifikansnivå på 5 % som var större än 1,96.

För att kontrollera om interceptet skiljde sig signifikant åt då H_0 inte förkastades enligt ekvation 8, beräknades ett t-värde enligt ekvation 9

$$t = \frac{(a_a - a_b) - b_{ab} * (X_a - X_b)}{\sqrt{S_{y*x} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{(X_a - X_b)^2}{\sum x_a^2 + \sum x_b^2} \right)}} \quad (9)$$

Där b_{ab} var en gemensam lutningskoefficient för modell a och b, a_a och a_b var interceptet för de båda modellerna och X_a och X_b var medelvärdet av alla vattenföringsvärden för de båda modellerna.

$$b_{ab} = \frac{(\sum xy)_a + (\sum xy)_b}{(\sum x^2)_a + (\sum x^2)_b} \quad (10)$$

För att kunna förkasta nollhypotesen för interceptet måste sannolikheten vara mindre än 5 % d.v.s 0,05.

4.5. ANTALET MÄTTADE TIMMAR PÅ OLIKA NIVÅER I MARKEN

För att få fram den totala tiden ett skikt i markprofilen varit mättat användes den framtagna anpassningen till sambandet mellan grundvattennivån och vattenföringen som togs fram i avsnitt 4.4 samt den beräknade vattenföringsdata för de olika områdena (CC, BS och Ref). Flödesdata för 2005, 2007 samt 2009 användes för att få en bild av hur de olika åren såg ut i förhållande till varandra.

Genom att använda anpassningen till sambandet och vattenföringen för varje år genererades en ”ny” tidsserie för grundvattennivån relativt markytan för perioden maj- oktober. För att generera tidsserien för 2007 användes Gw_Qmodell-09 för varje grundvattenrör tillsammans med vattenföringen för respektive delområde år 2007. Genom uträkningar i programmet Excel beräknades antalet timmar som en viss marknivå varit mättat (Ekv. 11). Grundvattennivåns läge i markprofilen delades in i centimetertjocka skikt. Diagrammen (Bilaga E) visar den totala tid då ett centimetertjockt skikt i marken har varit mättat under perioden.

$$t_{\text{antal mättade}}(h_{\text{nivå}}) = \text{antal.om}(h_{\text{grv, läge}} > h_{\text{nivå}}) \quad (11)$$

Där antal.om är en funktion i Microsoft Excel som beräknar antalet ackumulerade värden som är större än ett givet kriterium i det här fallet marknivå. $t_{\text{antal mättade}}$ var antalet timmar som en viss nivå ($h_{\text{nivå}}$) varit mättad under den aktuella tidsperioden (maj-oktober). $h_{\text{grv, läge}}$ var grundvattenytans läge i marken den aktuella timmen och $h_{\text{nivå}}$ den grundvattennivå som studerades den aktuella timmen.

4.6. FRAMRUNNEN VOLYM VATTEN I MARKEN

Vid framtagandet av volymen vatten som har runnit fram på olika nivåer i marken användes grundvattenmodellerna (avsnitt 4.4) för respektive år, med skillnaden att dessa hade inverterats. Skillnaden för de inverterade modellerna var att vattenföringen var en funktion av grundvattennivå och inte tvärtom.

Modellen består av funktion (Ekv. 12) där inparametern var grundvattennivån under markytan.

$$\frac{dQ}{dz} = G * e^{J * H_{grv\text{nivå}}} \quad (12)$$

$\frac{dQ}{dz}$ betecknar förändringen i flöde mellan olika nivåer i marken (l/s), koefficienterna G och J fås genom en regression av grundvattenytan mot vattenföringen och $h_{grv\text{ nivå}}$ var det intervall som grundvattenytan fluktuerade inom vid beräkning av de nivåer som var mättade (avsnitt 4.5).

För att sedan beräkna vilket lateralt flöde som skedde på en viss nivå i marken ($\text{m}^3\text{s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) användes ekvation 13

$$q(z) = \frac{\frac{dQ}{dz} * \Delta z}{b * \Delta z} * \frac{L * b}{A_{\text{område}}} \quad (13)$$

$\frac{dQ}{dz}$ var förändringen i flödet mellan två skikt i marken (l s^{-1}), Δz skillnaden i centimeter mellan olika nivåer i marken (m), b var bredden på transekten som antogs bidra med vatten till flödet genom tvärsnittsarean (m), L längden på transekten vilket motsvarar avståndet från grundvattenröret till vattendelare (m) och $A_{\text{området}}$ var avrinningsområdets area (m^2). I Tabell 6 visas avstånden från grundvattenrör till vattendelare.

Volymen på vattnet som flödade genom tvärsnittsarean beräknades med ekvation 14

$$v(z) = q(z) * t_{\text{mättad}}(z) \quad (14)$$

$t_{\text{mättad}}(z)$ var tiden (s) som en viss nivå i marken varit mättad och $q(z)$ gavs av ekvation 16.

Volymen framrunnet grundvatten beräknades för åren 2005, 2007 och 2009

De antaganden som gjordes för att beräkna volymen framrunnet vatten var att det laterala flödet sker parallellt med markytan och endast i den mättade zonen. Att det inte har sker något flöde förbi den beräknade tvärsnittsarean, eller att andra delar av avrinningsområdet förutom den en meter breda transekten bidrar med vatten. Det enbart var höjningen av grundvattenytan som ledde till ett ökat lateralt flöde (Seibert m.fl. 2009).

Tabell 6. Avståndet från grundvattenrör till avrinningsområdets gräns utefter det förmodade laterala flödet.

Rör	Avstånd (m)
T3B	102
T3E	79
T5A	120
T5E	98
T10B	211
T10G	160
T11A	237
T11C	230
T16B	196
T16D	185
T16G	151
T17A	192
T17C	186

4.7. ORSAKER TILL SKILLNADER I GRUNDVATTENSITUATIONEN

För att kunna kontrollera orsakerna till skillnaderna i grundvattennivå och framrunnen volym användes två olika metoder. Den första där sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring testades och den andra där den ökade vattenföring testades. Enbart vattenföringen för år 2009 användes i båda fallen, anledningen var att kunna utesluta påverkan från de olika årens nederbördsituation. Som vattenföring före avverkning för de avverkade områdena användes QRef-09, eftersom referensområdet antogs ha liknande förhållanden 2009 som de avverkade områdena hade under 2005. För vattenföring efter avverkning användes tidsserierna för respektive delavrinningsområde.

Olika benämningar användes för att beskriva vilka tester som gjordes, dessa förklaras nedan:

Effekt-Gw_Qmod

Effekt-Gw_Qmod före – Gw_Qmodell-05, Vattenföring QRef-09

Effekt-Gw_Qmod efter – Gw_Qmodell-09, Vattenföring QRef-09

Beskriver modellernas effekt på grundvattennivåerna med flödesdata från samma år.

Effekt-Avr

Effekt-Avr före – Gw_Qmodell-09, Vattenföring QRef-09

Effekt-Avr efter - Gw_Qmodell-09, Vattenföring QBS-09 och QCC-09

Beskriver avrinningens effekt på grundvattennivåerna med samma modell.

Det gjordes även en metod som användes som referens för att se hur stor skillnaden var mellan flödesdata för olika år och med flödesdata enbart för 2009.

Effekt-Tot

Effekt-Tot före – Gw_Qmodell-05, Vattenföring QRef-09

Effekt-Tot efter – Gw_Qmodell-09, Vattenföring QBS-09 och QCC-09

Beskriver den effekten av både modell och avrinning med flödesdata från samma år.

5. RESULTAT

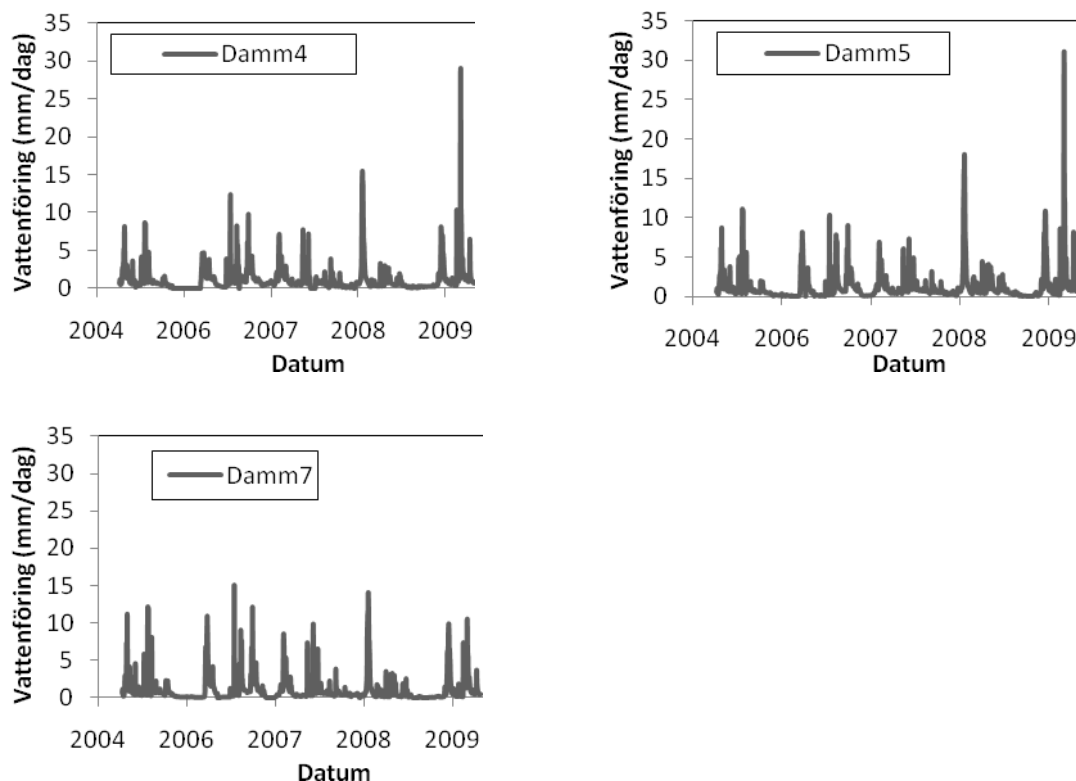
Resultatdelen är indelad i två delar. I den första delen sker beskrivning av resultaten för antal mättade timmar och volymen framrunnet grundvatten för år 2005, 2007 och 2009. I den andra delen beskrivs resultaten till de metoder som användes för att undersöka skillnader mellan åren.

5.1. FLÖDESDATA

Åren efter avverkningen var det en högre avrinning från det kalavverkade området och buffertzonsområdet jämfört med referensområdet (Figur 13). Mätningarna över avrinningen 2009 avslutades i september medan de andra åren innehöll hela året. År 2007 var ökningen 18 % för det kalavverkade området och 23 % för buffertzonsområdet jämfört med referensområdet för växtsäsongen (maj-oktober). Till skillnad från Sörensen (2009) baseras resultaten för 2007 på både avrinningen sommar och höst. Ökningen i den totala avrinningen för år 2009 var 90 % för det kalavverkade området och för buffertzonområdet 80 %. Vid jämförelse mellan referensområdets totala mängd för 2005, 2007 och 2009 var 2007 ett mycket torrare år än både 2005 och 2009. Värt att notera är att avrinningen under 2009 baseras på en kortare period än 2005 och 2007. Den totala avrunna volymen vatten under växtperioden för varje år i varje området kan ses i Tabell 7.

Tabell 7. Den totala avrinningen från CC-, BS- och Ref – områdena före och efter avverkningen.

	Kalavverkat - CC (m³)	Buffertzon - BS (m³)	Referens- Ref (m³)	Ökning i % för CC	Ökning i % för BS
2005	114501	32212	66392		
2007	97631	36768	51283	+18%	+23%
2009	174569	85581	66411	+90%	+80%



Figur 13. Vattenförlingen för vattenförlingsdammarna i Balsjö under perioden 2005-2009.

5.2. GRUNDVATTENSITUATIONEN 2005, 2007 OCH 2009

I detta avsnitt kommer resultatet av modellerna, grundvattenytans läge samt den volym vatten som har runnit fram att presenteras för åren 2005, 2007 och 2009.

5.2.1. Referensområdet (Ref)

Referensområdets modeller för perioderna före och efter avverkningen skiljer sig inte nämnvärt från varandra, det är enbart grundvattenrör T3E och T5E som uppvisar klara skillnader. Grundvattenrör T3E hade en annorlunda utformning i sambandet (Gw-Q) medan för grundvattenrör T5E hade sambandet förskjutits i höjdlid ca 5cm mellan åren före och efter avverkningen (Figur 14).

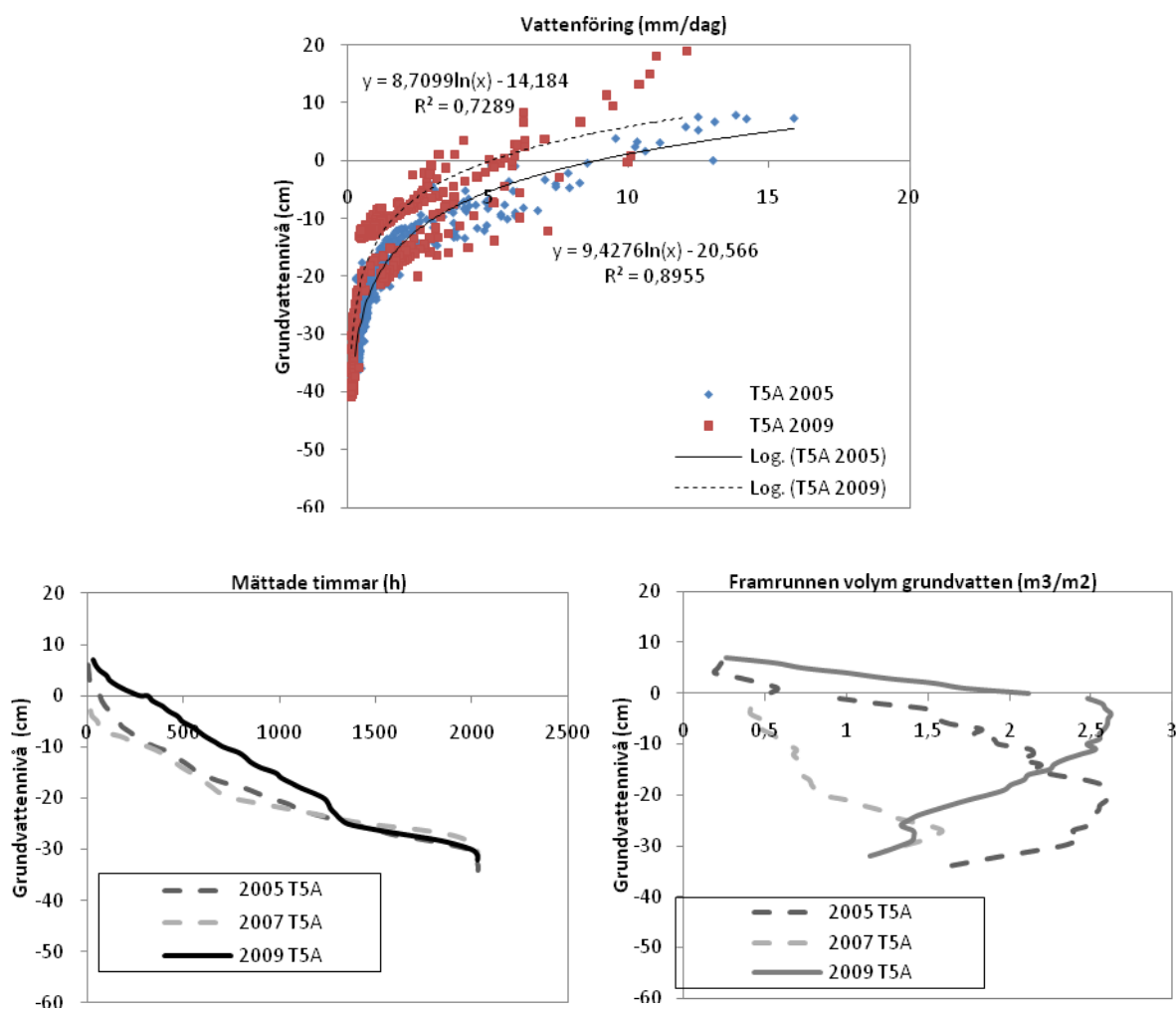
Alla grundvattenrör hade en statistiskt bevisad skillnad mellan sambanden för åren 2005 och 2009. Det var enbart grundvattenrör T5A (Figur 16) som inte hade en statistiskt bevisad skillnad i modellen (Gw-Q) utformning (lutningen) mellan åren 2005 och 2009 (Tabell 8). Alla grundvattenrör hade en bevisad skillnad mellan sambandens intercept med $p < 0,05$. Detta innebär att sambandet mellan grundvattenytan och vattenförlingen inte var densamma perioden efter avverkningen som före avverkningen. Vilket innebär att det för alla grundvattenrör hade skett en förändring i sambandet (Gw-Q) mellan 2005 och 2009.

Tabell 8. Tabell över sannolikheten att modellerna var lika mellan 2005 och 2009.

Grundvattenrör	p-värde (lutning)	p-värde (intercept)
T3B	0.01	<<0,05
T3E	<<0,05	-
T5A	0.22	<<0,05
T5E	<<0,05	-

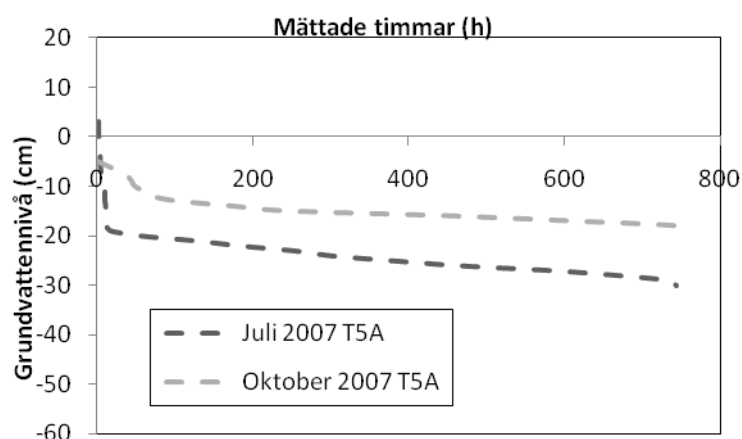
Skillnaderna i sambanden kom att påverka grundvattenytans läge för de olika åren. Antalet timmar en viss nivå i marken varit mättad i referensområdet visade att de två grundvattenrör som låg i anslutning till bäcken hade grundvattenytans läge i marken inte ändrats nämnvärt mellan 2005 och 2007. Det som kan vara värt att notera var att för de marknivåer som var mättade under en kortare period under 2009 i Ref-området låg grundvattennivån högre upp än för både 2005 och 2007. Vilket innebär att grundvattennivån har höjts vid höga flöden men inte vid låga flöden. Mellan 2005 och 2009 hade grundvattenytan höjts med 1,8–4,2 cm (Tabell 10).

Diagrammen som beskrev volymen grundvatten som hade runnit fram på olika marknivåer (m^3/m^2) visade att för grundvattenrören som låg närmast bäcken hade marknivån, för den maximala volymen vatten som runnit fram på en marknivå, förflyttats högre upp i markprofilen 2009 än tidigare år (Figur 14). Detta kan relateras till diagrammet över de mättade nivåerna (Bilaga E) och de framtagna modellerna. Enligt 2007 års profil över volymen framrunnet grundvatten hade en mindre maximal volym vatten runnit fram på en viss marknivå. Detta kan förklaras av att den totala mängden vatten som rann av under 2007 var lägre än under 2005 och 2009 med cirka 23 % för referensområdet (CC,BS 66000 m^3 mot Ref 51000 m^3) (Tabell 7).



Figur 14. Modell, diagram över mättade nivåer samt diagram över positionen för framrunnen volym grundvatten för grundvattenrör T5A i referensområdet (Ref).

En möjlig orsak till att grundvattenytan höjdes mellan 2007 och 2009 i referensområdet var att i juli månad 2009 förekom det höga flöden till följd av flera häftiga nederbördsperioder. Under perioder med låg vattenföring var det liknande förhållanden mellan 2007 och 2009. Vid jämförelse mellan 2007 och 2005 års grundvattennivåer såg man att dessa inte skiljde sig åt nämnvärt. Perioden under juli månad kom att påverka medelvärdet vid jämförelse mellan 2005, 2007 och 2009 års medelvärden av grundvattenytan. Vid en jämförelse mellan juli och oktober under 2007 visade på att det fanns en skillnad i grundvattenytans läge som beror på växternas upptag av vatten (Figur 15). För referensområdet var den skillnaden som störst +9,2cm för grundvattenrör T5A (Tabell 9).



Figur 15. Skillnaden i grundvattenytans läge för grundvattenrör T5A mellan juli och oktober månad 2007.

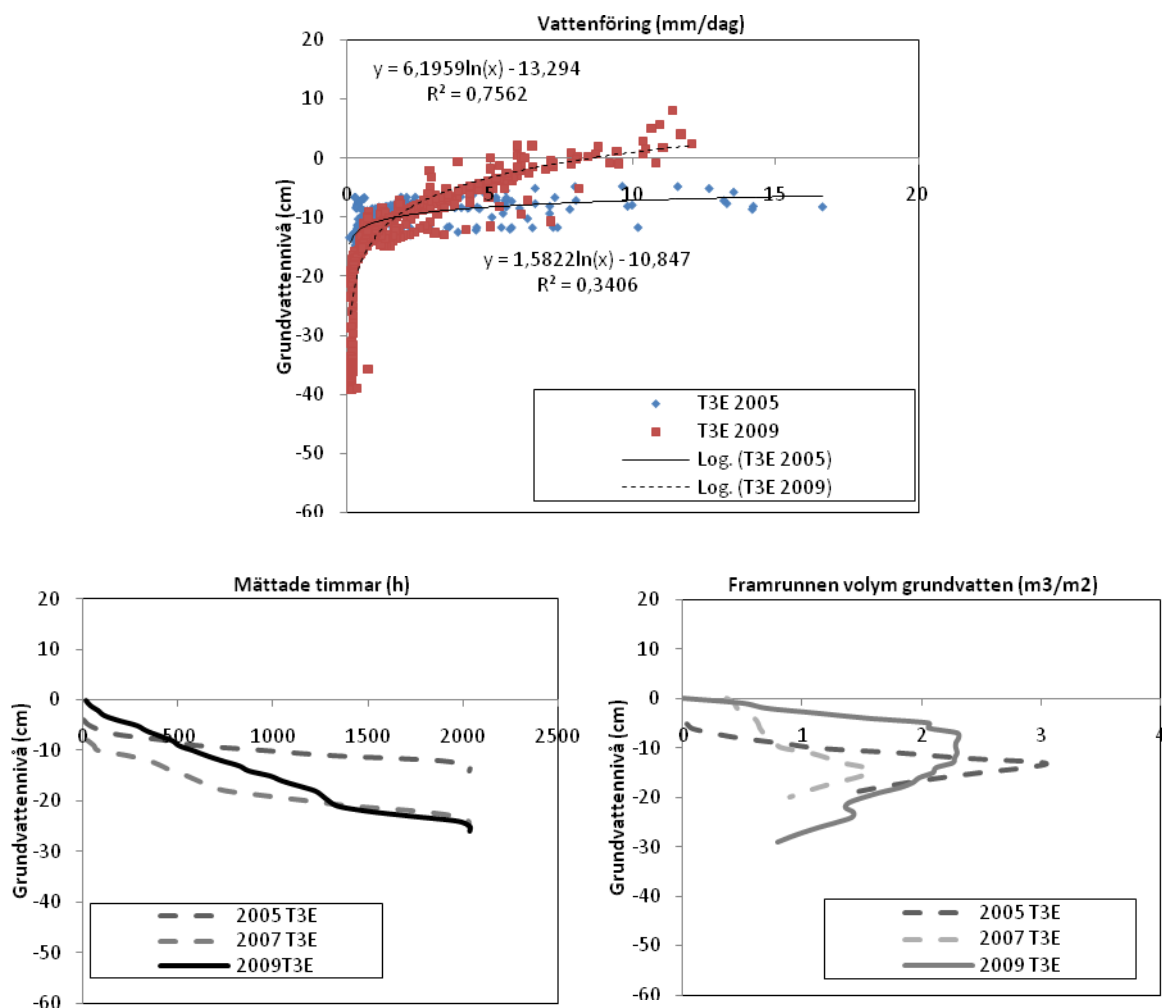
Tabell 9. Skillnader i medelvärde mellan juli och oktober för grundvattenrören i referensområdet.

Rör	Skillnader medelvärde (cm)
	Juni-oktober
T3B	4,46
T3E	5,77
T5A	9,19
T5E	8,07

För de andra två grundvattenrören som låg längre ifrån vattendraget skiljde sig resultaten en aning från de två grundvattenrör som låg närmare bäcken. Här var skillnaden i grundvattenytans läge mellan 2005 och 2009 närmare dubbelt så stor (+9,2cm) som för grundvattenrör T5A (Tabell 10).

För grundvattenrör T5E fanns ett liknande samband som för de grundvattenrör som låg närmare bäcken. De marknivåer som var mättade under en kortare tid låg 2009 års grundvattennivå högre upp än 2007 års grundvattennivå. Vid de marknivåer som var mättade under längre perioder (d.v.s. lågflöde) kommer dessa mer eller mindre att sammanfalla.

För grundvattenrör T3E hade det skett en sänkning av grundvattenytans läge mellan åren 2005 och 2009 (-5,1 cm). Resultaten för grundvattenrör T3E kan förklaras av skillnaderna i sambandet (Gw-Q). För de marknivåer som var mättade under längre tidsperioder vilket motsvarar låga flöden låg Gw_Qmodell-05 ovanför Gw_Qmodell-09 vilket gör att under låga flöden år 2005 låg grundvattenytan högre upp i marken än under 2009 vilket kan ses i Figur 16.



Figur 16. Modellerna för grundvattenrör T3E tillsammans med grundvattenytans läge och positionen för framrunnen volym grundvatten.

Volymen framrunnet grundvatten för de två grundvattenrör som låg längre ifrån vattendraget visade på samma resultat som för de två grundvattenrör som låg närmare vattendraget nämligen att 2009 års maximala volym framrunnet vatten låg högre upp i markprofilen än för de andra åren. Samtliga skillnader i grundvattenytans läge mellan åren 2005, 2007 och 2009 redovisas i Tabell 10. Båda grundvattenrören som låg längre ifrån bäcken hade ett mindre intervall där grundvattenytan fluktuerade under 2005 än både 2007 och 2009 (Tabell 10).

I Tabell 10 visas skillnaderna i grundvattenytans medelvärde under markytan mellan de olika åren. Referensområdets transekter (T3 och T5) var höjningen av grundvattenytan inte lika stor som för de andra transekterna då dessa låg i referensområdet och kom inte att påverkas av avverkningen utan enbart av skillnaden i nederbörd mellan åren. Mellan 2005 och 2007 hade det skett en sänkning av grundvattenytan för tre av fyra grundvattenrör i referensområdet, vilket förklaras av att det under 2007 var en mindre specifik avrinning än 2005 vilket även kan ses i Tabell 2. För perioden mellan åren 2007 och 2009 hade det skett en höjning av grundvattennivån, vilket indikerar att det inte nödvändigtvis var en ökad avrinning men att det var högre flöden under kortare perioder som gav en högre grundvattenyta för 2009. För vissa

av grundvattenrören låg grundvattenytan ovanför markytan under vissa tidsperioder då främst för grundvattenrören i transekt T5 (T5A, T5E) se bilaga E.

Tabell 10. Skillnader i grundvattenytans medelvärde. Intervallet som grundvattenytan fluktuerar för åren 2005, 2007 och 2009 (mättat 90 % - 10 % av tiden). Skillnaderna i den maximala framrunna volymen grundvatten och skillnaden i den maximala volymens position i marken mellan åren 2005-2009, 2005-2007 och 2007-2009.

Rör	Skillnader Medelvärde (cm)			Intervall (cm)			Skillnader i volym grundvatten (m ³ /m ²)			Skillnader Nivå (cm)		
	2005- 2009	2005- 2007	2007- 2009	2005	2007	2009	2005- 2009	2005- 2007	2007- 2009	2005- 2009	2005- 2007	2007- 2009
T3B	1,8	-0,5	2,3	6.1	9.0	14.8	- 2,7	-7,4	4,7	8,0	-3,0	11,0
T3E	-5,1	-8,1	3,0	4.9	11.6	19.1	-0,7	-1,5	0,7	4,0	-11,0	15,0
T5A	4,2	-0,6	4,8	22.0	18.5	30.4	0,03	-1,0	1,0	16,0	-7,0	23,0
T5E	9,2	4,9	4,2	11.8	16.2	26.7	-12,5	-17,3	4,7	12,0	-2,0	14,0
T10B	1,1	-1,4	2,5	8.9	7.5	18.3	13,3	-14,1	27,5	10,0	-2,0	12,0
T10G	8,2	6,2	2,0	25.2	6.0	14.4	74,9	-3,4	78,3	9,0	-4,0	13,0
T11A	14,6	11,4	3,2	17.7	9.6	23.2	51,8	13,8	38,0	27,0	13,0	14,0
T11C	5,2	3,7	1,5	5.1	4.5	10.9	32,2	-7,8	40,0	-1,0	-7,0	6,0
T16B	29,1	25,4	3,7	8,8	-0,7	9,4	7,7	0,3	7,4	38,0	26,0	12,0
T16D	9,5	8,7	0,8	-0,1	-2,1	2,0	128	107,5	20,9	11,0	10,0	1,0
T16G	17,1	14,2	2,9	-3,0	-9,7	6,7	9,4	11,3	-1,9	17,0	17,0	0,0
T17A	11,0	7,6	3,4	6,6	-2,0	8,5	8,6	0,6	8,0	19,0	8,0	11,0
T17C	10,8	8,1	2,7	8,1	1,2	7,0	2,0	-10,7	12,7	17,0	7,0	10,0

5.2.2. Buffertzonsområdet (BS)

För de grundvattenrör som låg i buffertzonsområdet hade en förändring skett i modellerna. Antingen genom att anpassningen till sambandet (Gw-Q) låg närmare markytan det vill säga att det var en högre grundvattennivå vid samma vattenföring efter avverkningen jämfört med före avverkning, eller att själva utformningen av modellen var olika före och efter avverkningen. Detta var särskilt tydligt för grundvattenrör T10G som hade en likhet med referensområdets grundvattenrör T3E. Detta visade sig främst genom att grundvattennivåerna för 2005 låg djupare ned i marken vid längre perioderna av mättnad. Vid perioder med mättnad under en kortare tid låg grundvattennivån ovanför 2009 års grundvattennivå (Bilaga E). Sambandet visade att grundvattenytan låg närmare markytan efter avverkning för låga flöden medan den låg högre upp före avverkningen.

Det fanns ingen statistiskt bevisad likhet mellan modellerna för varken lutning eller intercept för alla grundvattenrör förutom för T11A där nollhypotesen inte kunde förkastas (Tabell 11). Med anledning till att det för interceptet inte gick att säga att de var lika före och efter avverkningen, kan en förändring inte uteslutas för alla grundvattenrör i buffertzonsområdet (BS).

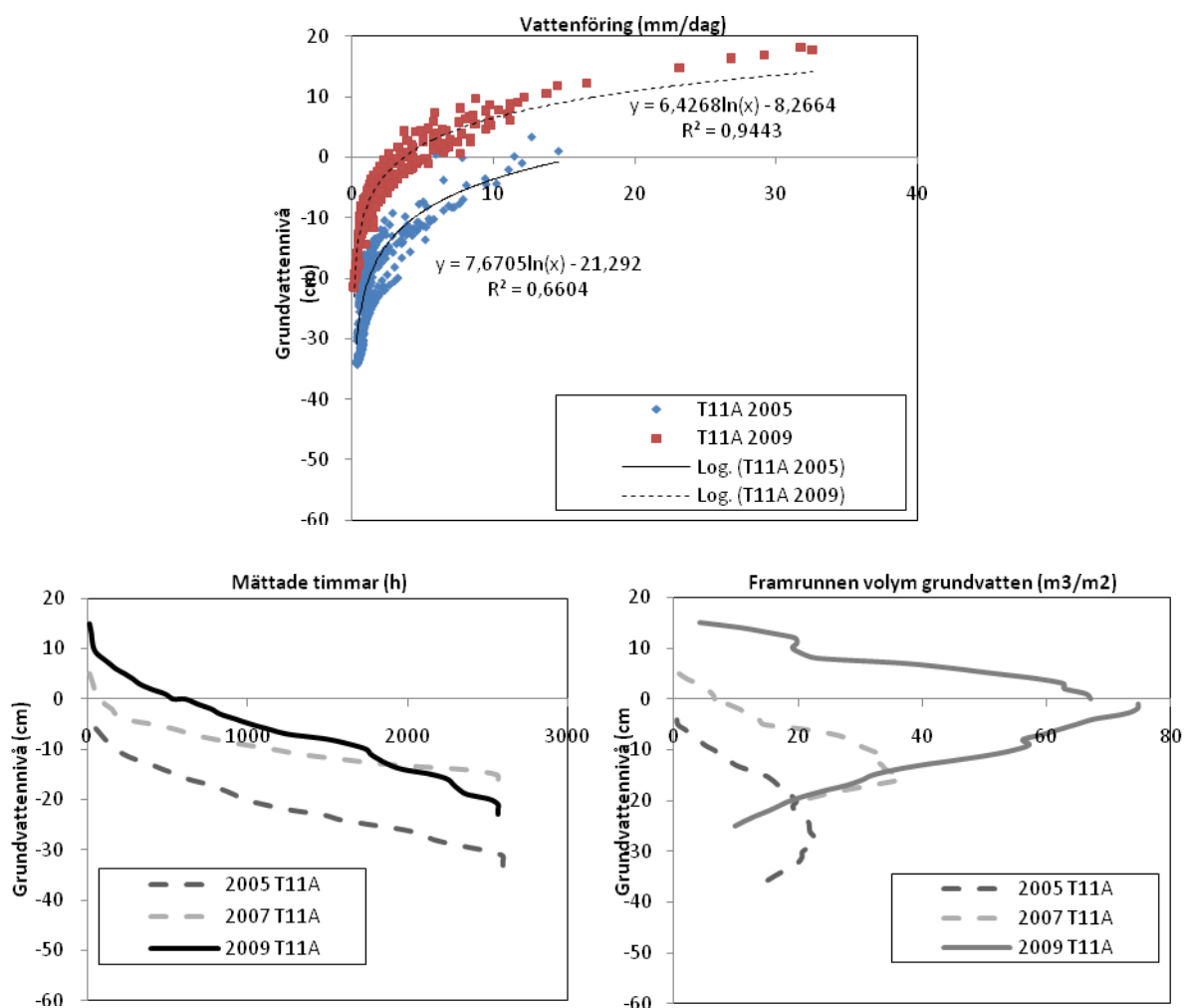
Tabell 11. Sannolikheten att det finns någon likhet mellan Gw_Qmodell-05 och Gw_Qmodell-09 för BS-området. Med p mindre än 0,05 kan nollhypotesen förkastas.

Grundvattenrör	p-värde (Lutning)	p-värde (Intercept)
T10B	<<0,05	-
T10G	<<0,05	-
T11A	0.05	<<0,05
T11C	0.01	-

Grundvattenröret T11A som låg i direkt anslutning till bäcken (<0,5m) hade den största skillnaden på grundvattenytans medelvärden mellan perioderna före och efter avverkningen på +14,6cm. De grundvattenrör som låg mellan 0,5m och upp till ca sex meter från bäcken hade en mycket mindre skillnad mellan perioderna före och efter avverkningen. Höjningen var här mellan en till fem centimeter (Tabell 10). För grundvattenrör T10B var grundvattennivåerna för 2005 och 2009 ungefär lika (+1,1cm).

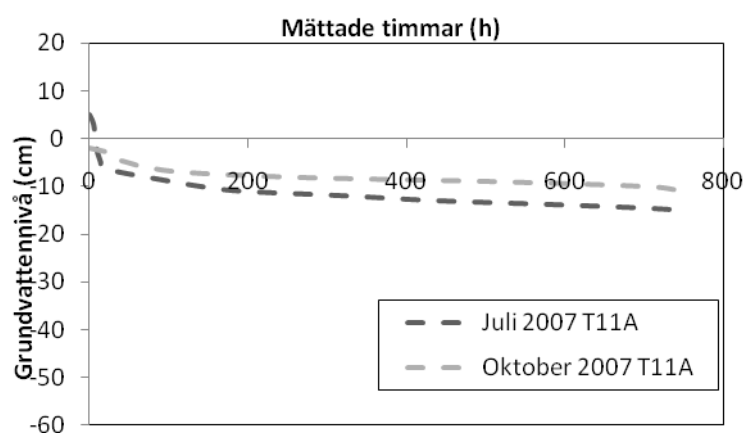
Ökningen var som störst mellan åren 2005 och 2007 och med den högsta höjningen för grundvattenrör T11A (+11,4cm). Detta förklaras genom förändringen av sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring vilket hade förskjutits uppåt i marken. Däremot var ökningen av grundvattenytan mellan år 2007 och 2009 i samma storleksordning (1,5-3,2cm) för alla grundvattenrör inom buffertzonsområde. Detta hade sitt ursprung i den ökade avrinningen under 2009 (Tabell 7). Det var en större skillnad mellan perioden 2005-2007 (-1,4 -11,4cm) i höjningen av grundvattenytan. Detta kan förklaras av att eftersom det var en lägre avrinning under 2007 än 2005 och att Gw_Qmodell-09 användes för 2007, var det förskjutna sambandet uppåt i marken (Gw_Qmodell-09) som bidrog till höjningen av grundvattenytan.

Vid de nivåer som var mättade under längre perioder kom 2009 års grundvattennivåer att närma sig för att sedan gå under 2007 års grundvattennivåer, vilket kan förklaras av en mycket torrare period (juni månad) under 2009 som ledde till en större sänkning av grundvattenytans läge (Figur 17).



Figur 17. Modellerna för grundvattenrör T11A tillsammans med grundvattenytans läge och positionen för framrunnen volym grundvatten.

Vid en jämförelse mellan juli månad och oktober månad 2007 visade grundvattenytan på en höjning för oktobermånad. Detta kan härledas till ett minskat upptag från växterna under hösten. Höjningen av grundvattenytan var som mest ca 4 cm för T11A (Tabell 12). Höjningen var inte alls lika stor som för referensområdet vilket kan förklaras av avverkningen.



Figur 18. Skillnaden i grundvattenytans läge mellan juli och oktober 2009 för grundvattenrör T11A.

Tabell 12. Skillnader i medelvärde (cm) mellan juli och oktober 2007 för BS-området.

Rör	Skillnader medelvärde (cm)
	Juni-oktober
T10B	3,0
T10G	2,3
T11A	3,7
T11C	1,8

Profilen med volymen framrunnet grundvatten för olika marknivåer låg högre upp i markprofilen för 2009 än både 2005 och 2007 års situation. Även den maximala volymen var högre för grundvattenrören närmast bäcken (T10B, T11A). För grundvattenrör T11C var skillnaden i volymen framrunnet grundvattenvatten mellan 2005 och 2009 inte så stort. Den största ökningen i den maximala volymen grundvatten hade skett i grundvattenrör T10G där skillnaden var ca $78 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (645 %). Intervallet som grundvattenytan fluktuerade inom var inte lika stort som de tidigare åren (Tabell 10). Den största höjningen av positionen av den maximala volymen grundvatten var för grundvattenrör T11A, vilket förklaras av närheten till vattendraget. De grundvattenrör som låg längre upp i transekten hade den maximala volymen vatten på ungefär samma nivå i markprofilen år 2009 som de tidigare åren (2005/2007) se Bilaga E. Även här var 2007 års volym framrunnet grundvatten lägre än både 2005 och 2009, förutom för grundvattenrör T11A. Resultaten kan relateras till diagrammen över antalet mättade timmar för markprofilen, där T11A visade att år 2007 låg mellan 2005 och 2009 års situation (Figur 17), där även skillnaden i avrinning mellan åren togs upp.

5.2.3. Kalavverkat område (CC)

I det kalavverkade området förekom den största skillnad i höjddled mellan modellerna. Det skiljde upp till 30 cm av grundvattenytans position vid hög vattenföring. Det var enbart modellerna för grundvattenrör T16D som inte hade en statistiskt bevisad skillnad i lutning ($p=0,62$) för en signifikansnivå på 5 % se Tabell 13. Alla grundvattenrör i CC-området hade en skillnad i intercept vilket innebär att man statistiskt inte kan se någon likhet mellan modellerna.

Tabell 13. Sannolikheten att modellerna var lika mellan åren 2005 och 2009. P mindre än 0,05 innebär att det inte fanns någon statistiskt bevisad likhet.

Grundvattenrör	p-värde (Lutning)	p-värde (Intercept)
T16B	$<<0,05$	-
T16D	0.62	$<<0,05$
T16G	$<<0,05$	-
T17A	$<<0,05$	-
T17C	$<<0,05$	-

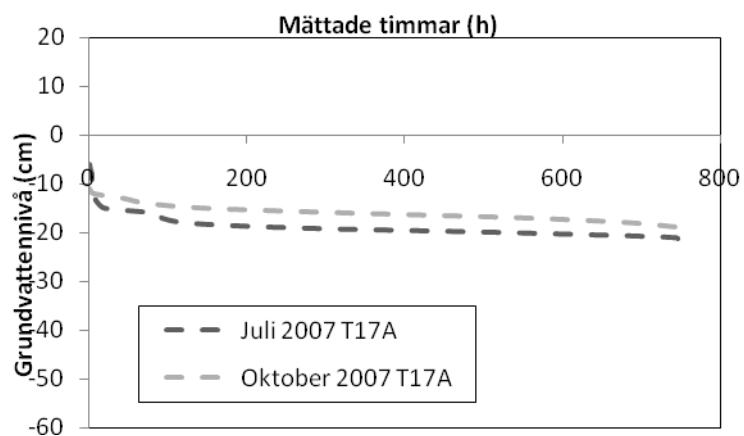
För det kalavverkade området fanns det en tydlig skillnad i grundvattennivåerna före och efter avverkningen. Även mellan åren efter avverkning kan man urskilja en höjning.

Grundvattennivåerna 2009 låg högre upp i markprofilen jämfört med 2007 vid höga flöden.

För de nivåer som var mättade under längre perioder fanns dock ingen synbar skillnad. Den största höjningen hade skett i grundvattenrör T16B där grundvattenytan hade stigit med 29,1 cm. Den minsta höjningen skedde i grundvattenrör T16D där höjningen var 9,5cm.

Grundvattenytan varierade mer under 2009 än 2007. Detta berodde bland annat på större nederbördsmängder vilket gjorde att grundvattenytan låg högre upp i marken vid hög vattenföring men på samma grundvattennivå vid låg vattenföring. I det avverkade området hade en större ökning skett generellt sett över alla grundvattenrör där den största ökningen skett mellan åren 2005 och 2009. Den största ökningen hade skett i de grundvattenrör som låg närmast bäcken (<6 m) och de längst ifrån bäcken (>30 m).

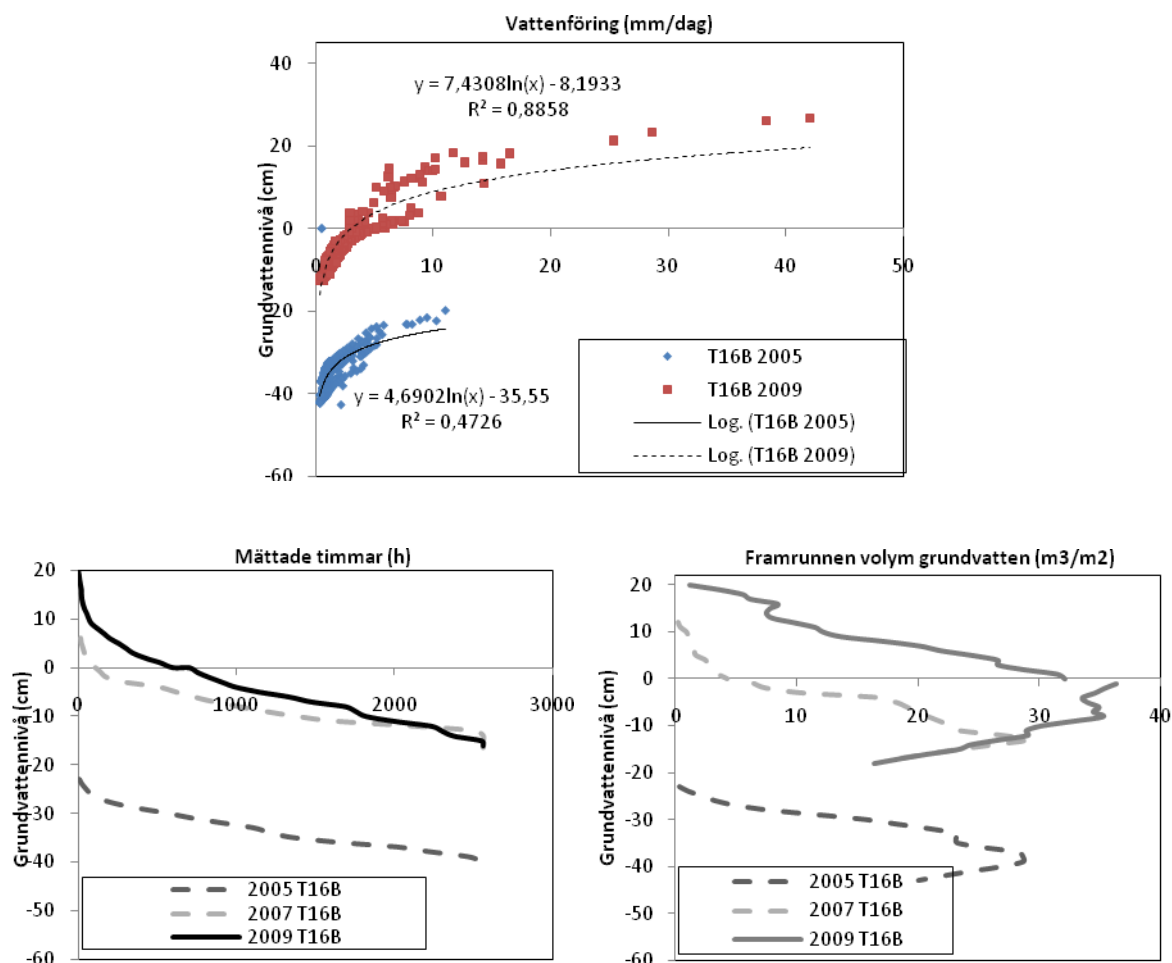
De variationer i upptag av vatten från växter som fanns mellan sommarmånaderna och höstmånaderna orsakade en skillnad av grundvattenytan inom året (Figur 19). Den största höjningen av grundvattenytan var i grundvattenrör T16B med 3,6 cm mellan juli 2007 och oktober 2007 (Tabell 14). Skillnaden var inte lika stor som i Ref-området vilket tyder på att grundvattenytan höjdes ytterligare några centimetrar under sommarmånaderna till följd av mindre upptag av vatten från växter.



Figur 19. Skillnaden i grundvattenytans läge mellan juli och oktober 2009 för grundvattenrör T11A.

Tabell 14. Skillnader i medelvärde (cm) mellan juli och oktober 2007 för CC-området

Rör	Skillnader medelvärde (cm)
	Juni-oktober
T16B	3,1
T16D	0,7
T16G	2,9
T17A	2,8
T17C	2,3



Figur 20. Modellerna för grundvattenrör T16B tillsammans med grundvattenytans läge och profilen för volymen framrunnet grundvatten.

För det kalavverkade området låg profilen av volymen framrunnet grundvatten högre upp i markprofilen för perioden efter avverkningen än perioden före avverkningen (Figur 20). Detta gällde för alla grundvattenrör i området. Den maximala volym framrunnet grundvatten för en marknivå var större för alla grundvattenrör vid en jämförelse mellan åren 2005 och 2009 (Tabell 10). För 2007 var den maximala volymen större för grundvattenrör T16G år 2007 än 2009. Den största volymen var för grundvattenrör T16D som även hade det minsta intervallet (Bilaga F) jämfört med de andra grundvattenrören.

Sammanfattningsvis kan man säga att det den största höjningen av grundvattenytan har skett i det kalavverkade området. Den största höjningen skedde mellan åren 2005 och 2007 då det under 2007 användes en ny modell som beskrev sambandet efter avverkningen. Ökningen av det maximala laterala flödet förflyttades uppåt i markprofilen åren efter avverkningen samt att det maximala laterala flödet hade ökat. Det laterala flöde i buffertzonsområdet var mer varierande vad gällde storleken och vart i marken det hade skett. Även referensområdet hade samma tendenser.

Referensområdet hade den största skillnaden i grundvattenytans läge mellan olika månader (juli/oktober 2007) vilket tyder på att en större mängd vatten togs upp av växterna under sommarmånaderna. Höjningen var inte alls lika stor i de båda avverkade områdena vilket innebar att det har skett en större grundvattenbildning under sommaren i de avverkade områdena jämfört med referensområdet.

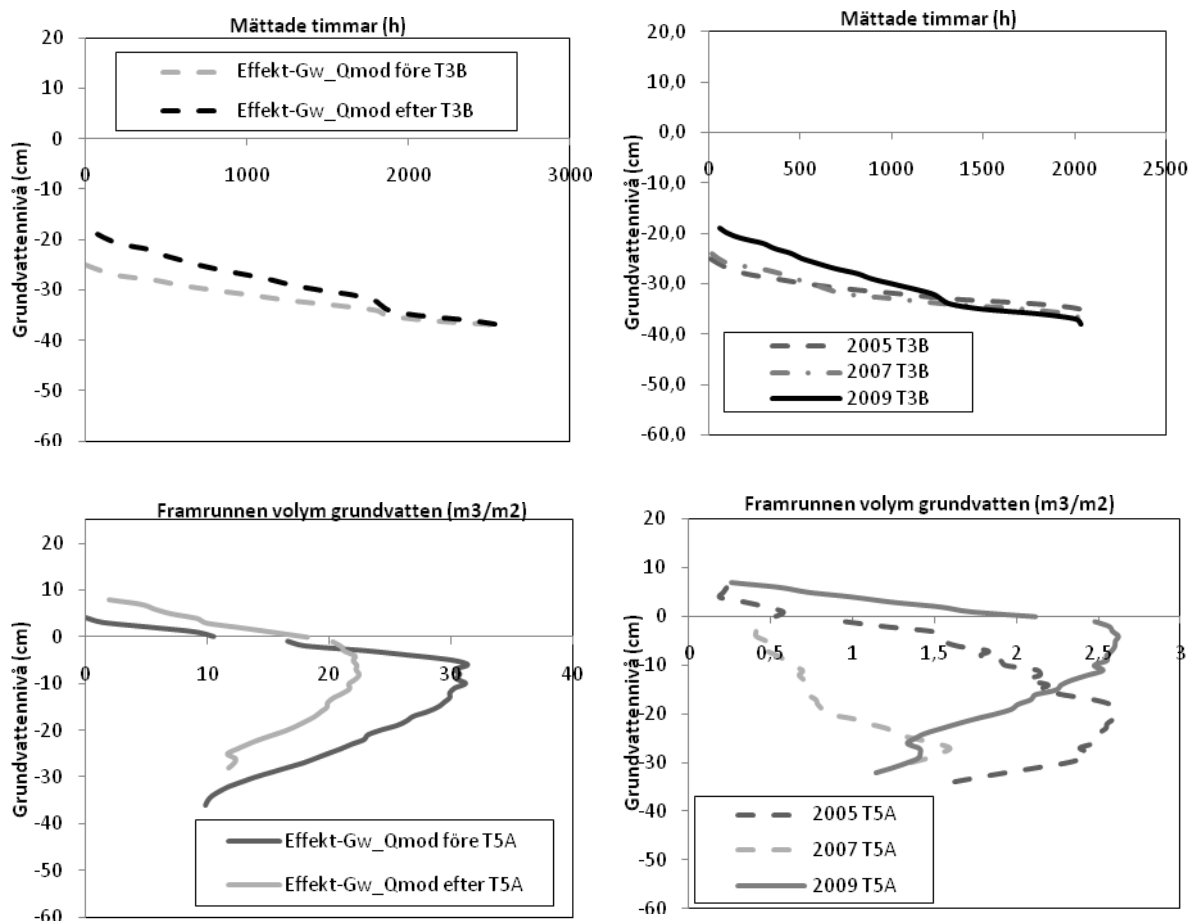
5.3. ORSAKER TILL SKILLNADERNA I GRUNDVATTENSITUATIONEN

I detta avsnitt kommer varje delområde att presenteras utifrån resultaten från de olika metoder som användes.

5.3.1. Referensområde (Ref)

För att några slutsatser skulle kunna dras om vilka orsakerna var skillnaderna i grundvattennivå mellan 2005 och 2009. Var först effekterna av de olika årens modeller i referensområdet tvungna att analyseras. I referensområdet analyserades enbart modellernas inverkan på grundvattenytans läge, detta innebar att endast *Effekt-Gw_Qmod* användes. Effekten från *Effekt-Gw_Qmod* på grundvattenytans höjning var större än den faktiska höjningen (2005-2009). Skillnaden i medelvärden var cirka två centimeter högre på grundvattenytan för *Effekt-Gw_Qmod* än för situationen 2005 och 2009 (Figur 21).

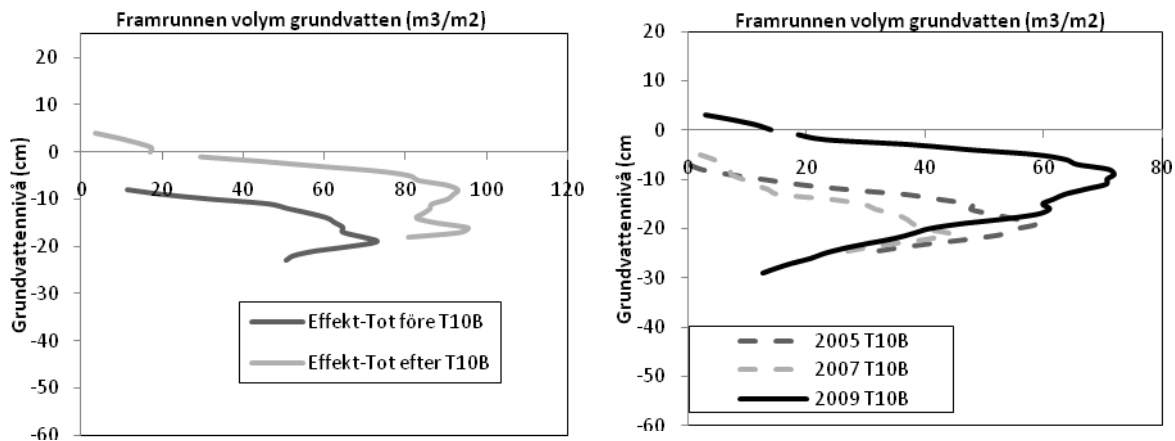
Effekten av *Effekt-Gw_Qmod* på den framrunna volym vatten skiljde sig åt både i maximalt volym och vilka marknivåer som vattnet hade runnit igenom. Det var enbart T3E och T5A som hade någorlunda liknande profiler över framrunnen volym grundvatten (Figur 21). Samma resultat framkom i avsnitt 5.2.1 där situationen för år 2005, 2007 och 2009 analyserades. Skillnaden var att *Effekt-Gw_Qmod* för grundvattenrör T5A:s profil över framrunnen volym grundvatten låg högre upp i marken än 2005 (Bilaga G).



Figur 21. Grundvattennivåns läge med Effekt-Gw_Qmod och situationen år 2005, 2007 och 2009 (översta bilderna) för grundvattenrör T3B. Profildiagram över framrunnen volym grundvatten för Effekt-Gw_Qmod och 2005, 2007 och 2009 års situation för grundvattenrör T5A.

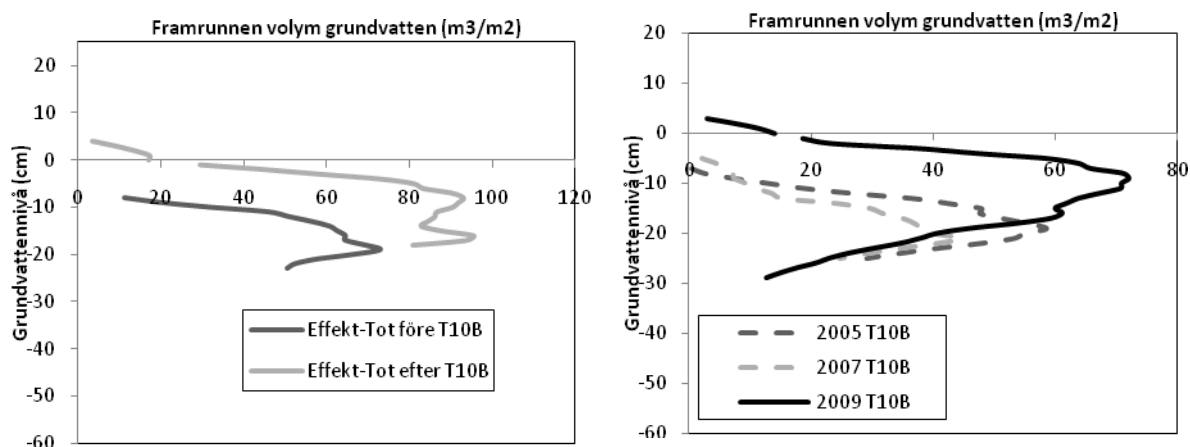
5.3.2. Buffertzonsområde (BS)

Resultaten av *Effekt-Tot* visade på att det hade skett en höjning av grundvattennivån efter avverkningen. Vilket var samma resultat som framkom i avsnitt 5.2.2. Skillnaden var att grundvattenytan låg i medeltal omkring 0,5-2cm högre upp i marken för *Effekt-Tot* jämfört med den egentliga situationen. Samma resultat hade även den framrunna volymen grundvatten, där den maximala volymen som runnit på en viss marknivå var större. För vissa grundvattenrör låg även den maximala volymen grundvatten högre upp i markprofilen med Gw_Qmodell-09 (T10G, T11A). Grundvattenrör T10B och T11C hade profilen över framrunnen volym grundvatten på ungefär samma nivå i marken (Figur 22).



Figur 22. *Effekt-Tot* på grundvattenytans läge med Gw_Qmodell-05 och Gw_Qmodell-09 och *Effekt-Tot* på profilen över framrunnen volym vatten för grundvattenrör T10B.

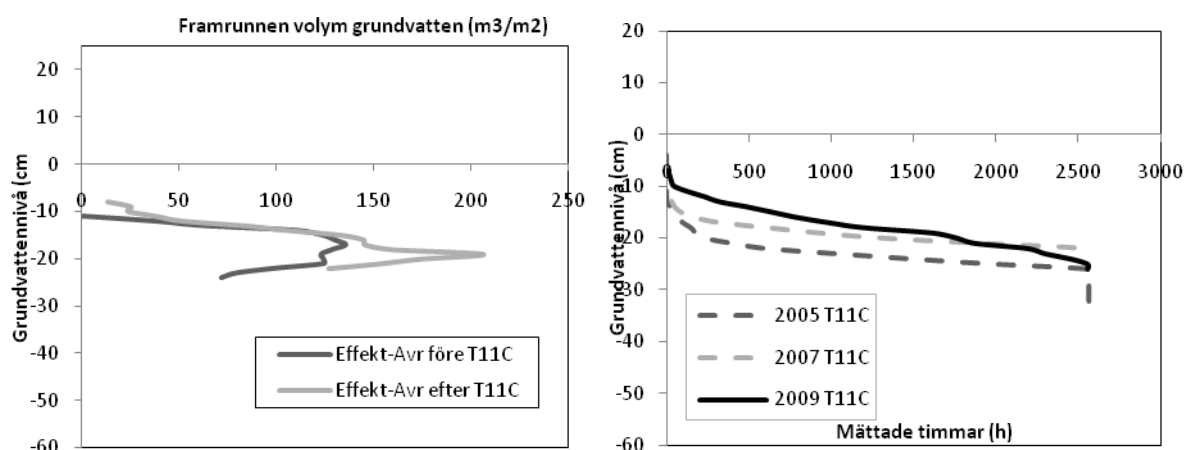
För att studera *Effekt-Gw_Qmod* av både grundvattenytan och det volymprofilen användes enbart flödesdata för QRef-09 tillsammans med Gw_Qmodell-05 och Gw_Qmodell-09. Vid kontroll av grundvattenytans läge var resultatet ungefär detsamma som för 2005 och 2009 års egentliga situation. Detta innebar nämligen att modellerna gav ungefär samma höjning av grundvattennivån för *Effekt-Gw_Qmod*. Vilket innebar att höjningen av grundvattenytan var något lägre än för *Effekt-Tot*. Vid kontroll av *Effekt-Gw_Qmod* på volymen framrunnet grundvatten visade resultatet att profilen över framrunnet volym grundvatten låg högre upp i markprofilen för Gw_Qmodell-09 än för Gw_Qmodell-05 (Tabell 15). Ökningen av den maximala volymen grundvatten var stort ($>50\text{m}^3/\text{m}^2$, 12-300 %) för alla grundvattenrör utom T10B (Figur 23). Vid jämförelse med 2005 och 2009 års värden var det en något större volym vid *Effekt-Gw_Qmod* medan placeringen av profilen över framrunnen volym grundvatten låg på ungefär samma nivå i marken.



Figur 23. *Effekt-Gw_Qmod* på framrunnen volym grundvatten med Gw_Qmodell-05 och Gw_Qmodell-09 för grundvattenrör T10B. Framrunnen volym grundvatten för situationen år 2005, 2007 och 2009.

Effekten av *Effekt-Avr* på grundvattennivåerna vid användandet av Gw_Qmodell-09 var relativt liten om man såg till hur *Effekt-Avr* påverkade grundvattennivån. Den maximala höjningen som hade skett vid en ökad vattenföring var för grundvattenrör T11A med en förhöjd medelgrundvattennivå på ca 1,7 centimeter och en ökad framrunnen volym på $8,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Tabell 15). Den minsta ökningen av grundvattennivån har skett för grundvattenrör T10G med ca en centimeters höjning medan ökningen av den framrunna volymen grundvatten var $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Värt att notera är att höjningen av grundvattennivån minskade ju längre från bäcken respektive grundvattenrör var placerat. Detta tyder på att en höjning av grundvattennivåerna bidrar mest till ett ökat flöde närmast vattendraget. Med vattenföringsdata för QBS-09 låg grundvattenytan högre upp i markprofilen för de perioder då nivåerna var mättade under en längre tid ($>2000\text{h}$) (Bilaga G). Grundvattennivåerna vid låga flöden hade höjts vid användandet av vattenföringen för QBS-09. Detta innebar att det främst var de låga grundvattennivåerna som höjdes efter avverkning, medan det hade en mindre påverkan på grundvattennivåer närmare markytan.

Vid kontroll av *Effekt-Avr* på den framrunna volymen grundvatten var dessa resultat ungefär liknande före och efter avverkningen (Bilaga G). Det hade skett en liten höjning av volymen framrunnet grundvatten med vattenföringen för QBS-09. Storleken på den maximala volym framrunnet grundvatten på en viss marknivå var större med vattenföringen QBS-09 ($2\text{--}70 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 3-50 %). Grundvattenrör T11C var det som skiljde sig åt mest med ett större maximal framrunnen volym grundvatten med vattenföringen QBS-09 (Figur 24). Detta visade på att ökad vattenföring inte ledde till någon betydande höjning av positionen för profilen av grundvattnets framrinning i marken men det ledde till att den maximala volymen framrunnet grundvatten ökade.



Figur 24. Effekt-Avr för grundvattenrör T11C med Gw_Qmodell-09, QRef-09 och QBS-09, t.h. 2005, 2007 och 2009 års mättade marknivåer.

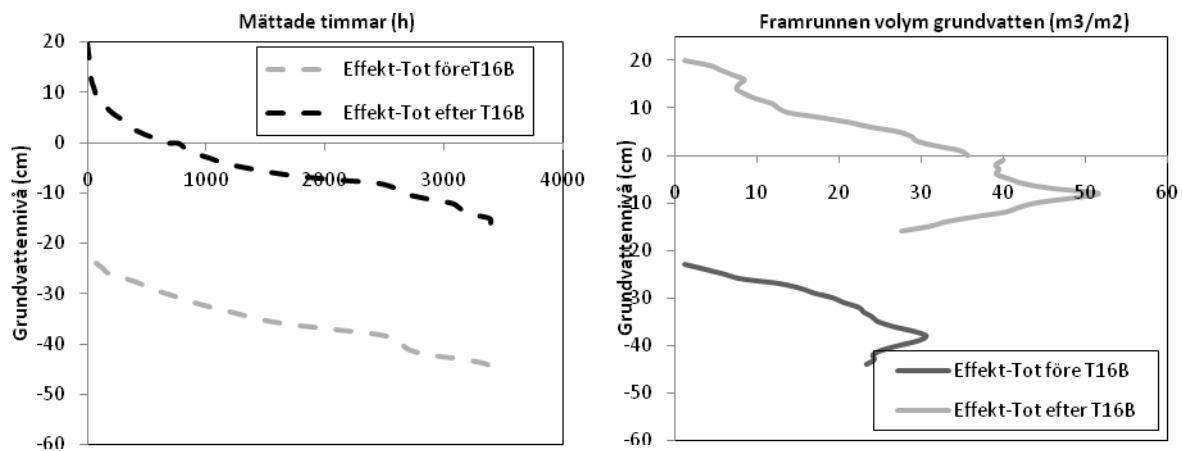
Tabell 15. Skillnaderna i grundvattenytans medelvärde. Den maximala framrunna volymen grundvatten. Marknivån där den maximala volymen grundvatten runnit fram för de tre olika metoderna med antingen Gw_Qmodell-05 eller -09 och QBS-09 eller QRef-09 i BS- och CC-området.

Skillnader	Grundvattenytans medelvärde (cm)			Maximal framrunnen volym(m ³ /m ²)			Nivån för maximal framrunnen volym (cm)		
	Effekt-Tot	Effekt-Gw_Qmod	Effekt-Avr	Effekt-Tot	Effekt-Gw_Qmod	Effekt-Avr	Effekt-Tot	Effekt-Gw_Qmod	Effekt-Avr
T10B	2,8	1,5	1,3	22,5	9,1	2,6	3,0	8,0	-4,0
T10G	11,1	10,1	1,1	100,2	90,0	10,2	17,0	0,0	0,0
T11A	16,5	14,8	1,7	67,9	59,0	8,9	27,0	27,0	0,0
T11C	5,5	4,2	1,4	121,8	50,9	71,2	6,0	8,0	-2,0
T16B	30,4	27,0	3,4	21,0	4,4	14,8	30,0	35,0	-7,0
T16D	10,1	9,4	0,7	188,1	127,8	60,2	10,0	10,0	0,0
T16G	19,6	17,1	2,5	15,6	8,2	7,4	4,0	19,0	3,0
T17A	12,4	9,3	3,1	24,8	8,4	16,4	11,0	20,0	-8,0
T17C	11,5	9,0	2,5	12,9	-15,3	16,3	11,0	16,0	-6,0

5.3.3. Kalavverkat område (CC)

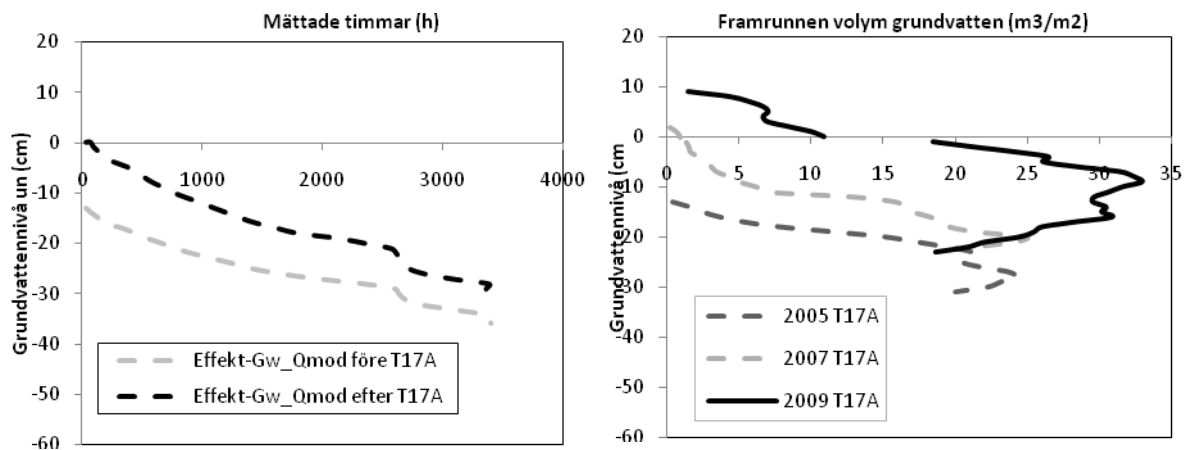
Diagrammen för *Effekt-Tot* visade på att grundvattenytan hade höjts med upp till 30 centimeter för T16B. Alla grundvattenrör i delområdet hade fått en förhöjd grundvattennivå med *Effekt Tot* efter avverkningen med omkring 1-2,5 cm jämfört med den egentliga situationen år 2005 och 2009 (Bilaga G). Den framrunna volymen grundvatten för *Effekt-Tot* hade samma utseende som år 2005 och 2009 vilket innebar att den framrunna volymen grundvatten med Gw_Qmodell-09 och vattenföring QCC-09 låg både högre upp i markprofilen samt att den maximala grundvattenvolymen var större än med Gw_Qmodell-05 och vattenföring QRef-09 (Figur 25). Den största skillnaden i höjdlängd fanns i de grundvattenrör som antingen låg närmast vattendraget eller de som låg längst ifrån vattendraget. Den största ökningen hittades i grundvattenrör T16B där djupet för de mättade nivåerna hade höjts med ca 30 centimeter, och den största skillnaden i den maximala

grundvattenvolymen var för grundvattenrör T16D med $188 \text{ m}^3/\text{m}^2$ vilket var $60 \text{ m}^3/\text{m}^2$ större än skillnaden mellan de egentliga situationerna 2005 och 2009.



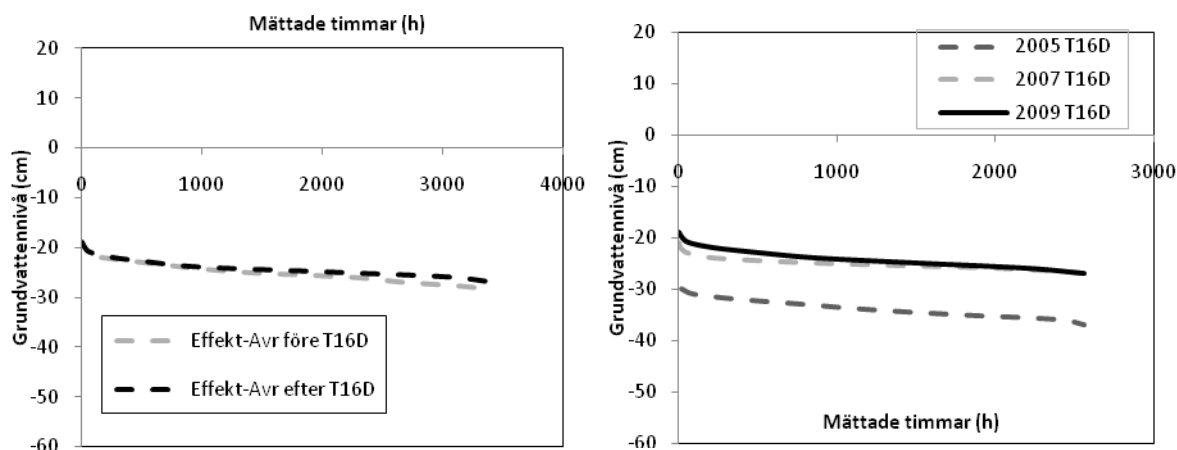
Figur 25. Effekt av *Effekt-Tot* av grundvattenytans läge för grundvattenrör T16B samt effekten av *Effekt-Tot* på profilen över i vilka marknivåer som grundvattnet runnit igenom.

Effekten av *Effekt-Gw_Qmod* på vilka marknivåer som var mättade var att Gw_Qmodell-09 gav en högre grundvattennivå än Gw_Qmodell-05 med samma flödesdata. Fanns även en tendens att skillnaden minskar desto djupare markskikt som var mättade för de grundvattenrör som låg närmast bäcken (<5m). Effekten av *Effekt-Gw_Qmod* på volymen framrunnet grundvatten visade resultaten ett liknande utseende som den egentliga situationen för åren 2005 och 2009. Nämligen att det hade skett en ökning av den maximala grundvattenvolymen med $4\text{-}127 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (3-350 %) se Bilaga G. Samt att profilen för framrunnet grundvatten hade höjts i markprofilen med ungefär 10-35 centimeter (Figur 26).



Figur 26. Effekten av *Effekt-Gw_Qmod* på vilka marknivåer som grundvattnet runnit igenom för grundvattenrör T17A samt volymen framrunnet grundvatten år 2005, 2007 och 2009.

Effekten av *Effekt-Avr* på vilka marknivåer som var mättade visade på att det enbart var en liten skillnad. Skillnaden i medelvärde låg mellan 0,7-3 centimeters höjning av grundvattenytan för det kalavverkade området (Figur 27). Effekten av *Effekt-Avr* på volymen framrunnet grundvatten sträckte sig enbart till en högre maximal volym (Bilaga G). Detta innebär att en ökad vattenföring endast ger en ökad framrunnen volym grundvatten. Ökningen i volymen skiftade mellan 7-60m³/m² för de olika grundvattenrören.



Figur 27. Effekten av *Effekt-Avr* av grundvattenytans läge för grundvattenrör T16D samt grundvattenytans läge år 2005, 2007 och 2009.

Tabell 16. Skillnaderna i grundvattenytans medelvärde. Maximala framrunna volymen grundvatten. Marknivån för den maximala volymen grundvatten före och efter avverkningen för de olika metoderna i CC-området.

Skillnader	Grundvattenytans medelvärde (cm)			Maximal framrunnen volym (m ³ /m ²)			Nivån för maximal framrunnen volym(cm)		
	Effekt-Tot	Effekt-Gw_Qmod	Effekt-Avr	Effekt-Tot	Effekt-Gw_Qmod	Effekt-Avr	Effekt-Tot	Effekt-Gw_Qmod	Effekt-Avr
T16B	30,4	27,0	3,4	21,0	4,4	14,8	30,0	35,0	-7,0
T16D	10,1	9,4	0,7	188,1	127,8	60,2	10,0	10,0	0,0
T16G	19,6	17,1	2,5	15,6	8,2	7,4	4,0	19,0	3,0
T17A	12,4	9,3	3,1	24,8	8,4	16,4	11,0	20,0	-8,0
T17C	11,5	9,0	2,5	12,9	-15,3	16,3	11,0	16,0	-6,0

6. DISKUSSION

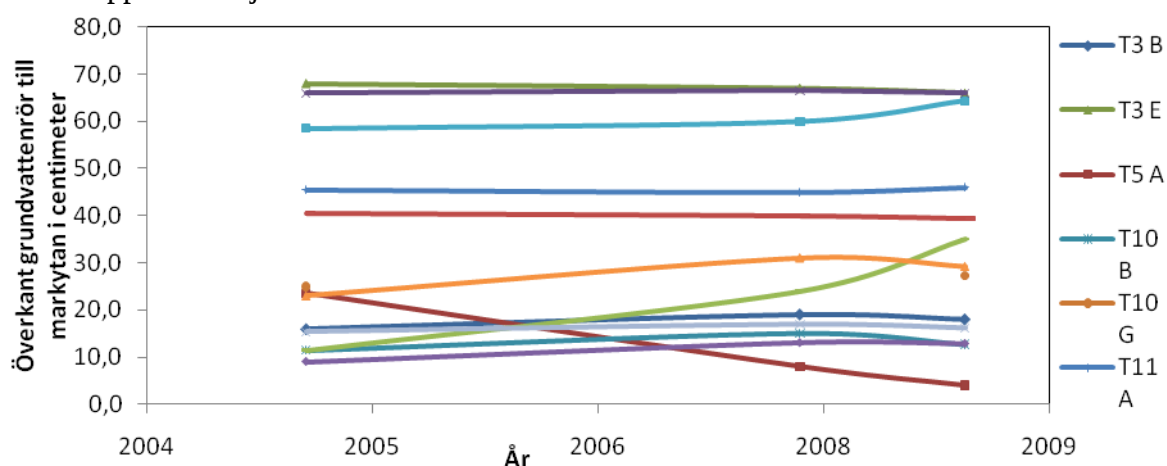
6.1. DATABEARBETNING

Vid justering av de uppmätta värden där grundvattenrörets höjd över marken användes kan det ha förekommit mätfel. Detta eftersom det vid denna typ av mätningar kan vara svårt att vara konsekvent angående markytans position p.g.a. lokala höjdskillnader kring grundvattenröret (Figur 28).



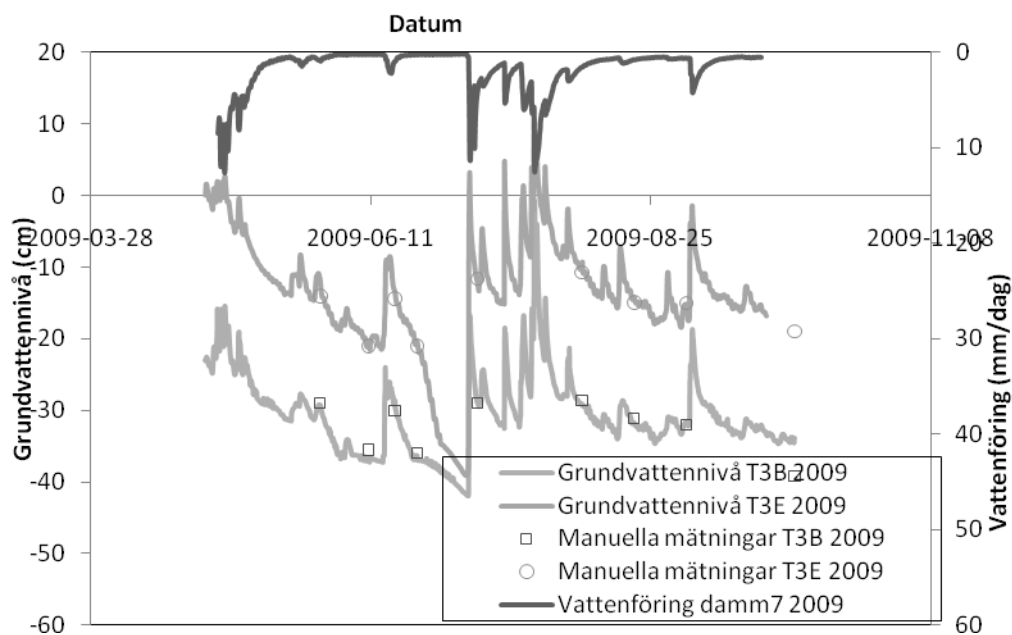
Figur 28. Grundvattenrör T16D som uppvisar höjdskillnader kring röret.

Eftersom det inte hade gjorts någon notering om vart på grundvattenröret som markytan hade bedömts vara belägen vid mätningarna år 2005, kan det ha förekommit en skillnad mellan åren fast förhållandena egentligen inte hade ändrats. I Figur 29 visas variationerna i grundvattenrörets höjd över marken för de använda grundvattenrören för åren 2005, 2008 och 2009. Uppmätta höjder saknas för år 2007.



Figur 29. De uppmätta avstånden för höjden över markytan till grundvattenrörets överkant för alla grundvattenrör år 2005, 2008 och 2009.

Kalibreringen av grundvattennivån var beroende av att det fanns många manuella mätningar som med fördel hade utförts av samma person för att få ett så litet fel som möjligt. Eftersom mätningarna gjordes med ett stort tidsspänn har flera olika personer varit inblandade i mätningarna vilket kan ha lett till skillnader i de uppmätta värdena. De fel som kan ha uppkommit kommer inte att ge skillnader inom året eftersom felet finns med vid justeringen över hela året utan det är i jämförelsen mellan åren som kan ha påverkats av mätningarna. Kalibreringskurvan kan skifta en hel del i lutning och offset om det enbart finns få mätpunkter. Detta kan göra att kalibreringen av de kontinuerliga grundvattentidsserierna kan bli missvisande. En kontroll av kalibreringens effekt kan tydligast göras i ett diagram med tidsserien av de kontinuerligt uppmätta grundvattennivåerna tillsammans med de manuellt uppmätta grundvattennivåerna (Figur 30).



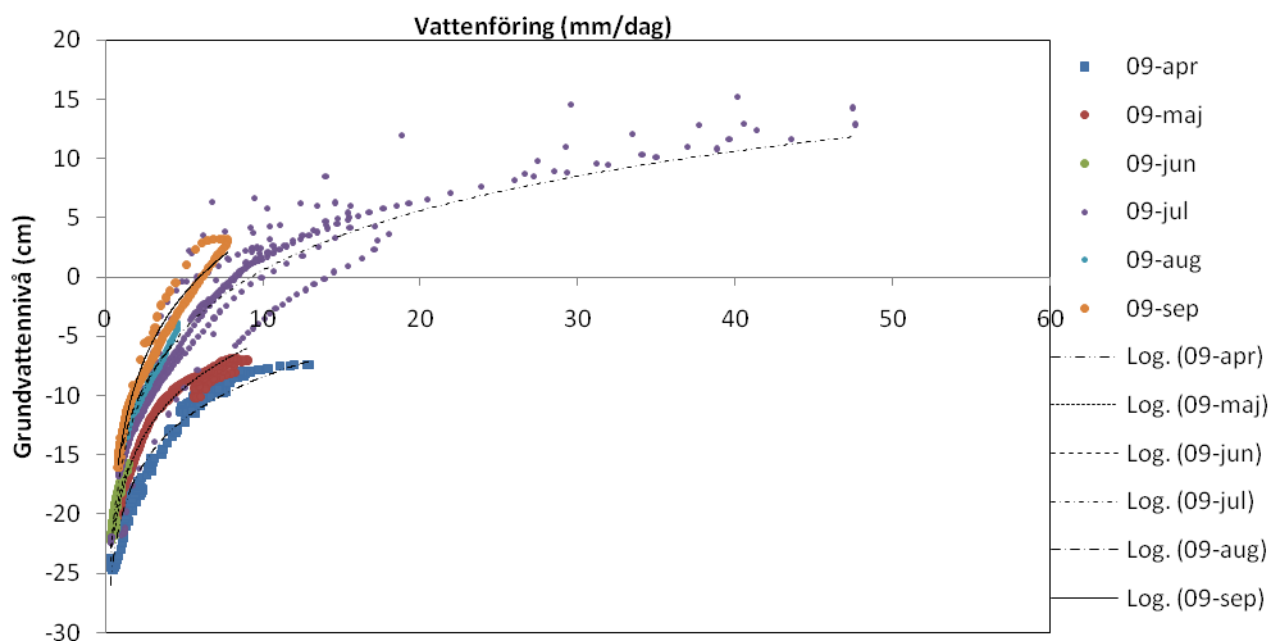
Figur 30. Manuella och kontinuerliga grundvattennivå värden för transekt T3 i referensområdet.

Vid vattenföringsberäkningarna användes från början två stycken olika avbördningskurvor samt två olika areor för avrinningsområdena till vattenföringsstationerna. Det antogs att de senare av dessa två skulle användas eftersom avbördningskurvan innehöll fler mätpunkter med högre vattenföring och de nya beräknade areorna över delområdenas avrinningsområden. De nya areorna bedömdes vara mer riktiga eftersom ytterligare platsstudier hade gjorts vilket gjorde areorna något större.

6.2. GRUNDVATTENMODELLER

Sambandet mellan vattenföring och grundvattennivåerna fluktuerade mycket mer under 2009 än under 2005. Detta kan bero på att det under 2009 fanns både tidpunkter med extremt hög vattenföring samt perioder med lägre vattenföring. I övrigt var de förväntade resultaten enligt Bishop (1991) d.v.s. att det existerar ett exponentiellt förhållande mellan grundvattennivå och vattenföringen i bäcken.

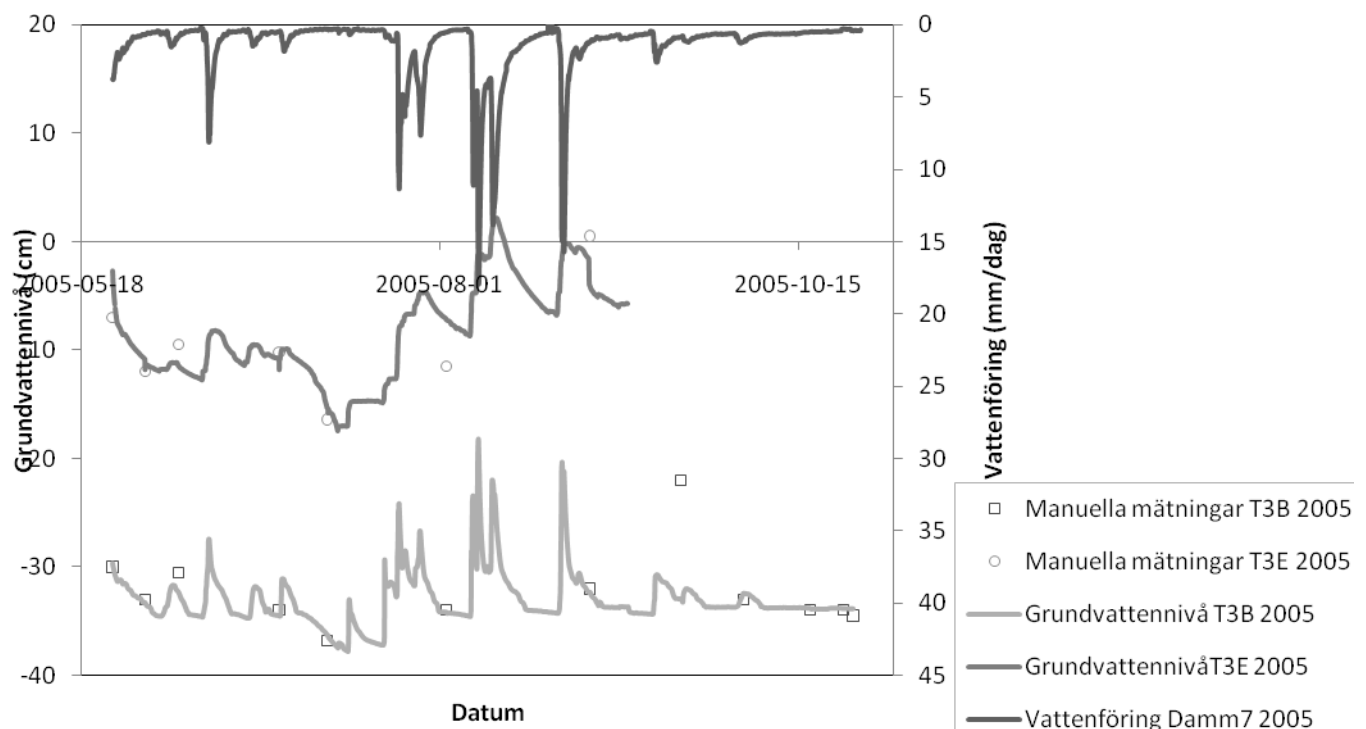
Det som är värt att notera är att för i princip alla grundvattenrör ligger Gw_Qmodell-09 högre upp i markprofilen. Detta kan bero på annorlunda förhållanden som t.ex. större variation i vattenföringen eller andra snöförhållanden eller temperatur under vintern 2008/2009 än under vintern 2004/2005. Snöförhållanden och temperaturen kan ha påverkat tjäldjupet och som i sin tur kan påverka uppluckringen av jorden. Ett grundare tjäldjup gör att uppluckringen inte blir lika djup vilket skulle kunna ha effekten att modellerna förskjuts uppåt i markprofilen (Eriksson m.fl. 2005). I Figur 31 visas de månadsvisa förhållandena mellan vattenföring och grundvattennivåer på en förskjutning uppåt i markprofilen under året. En mer uppluckrad jord gör att den hydrauliska konduktiviteten blir något högre än vid en mera kompakt jord. Detta visar på att det under året sker en kompaktering och en förflyttning av sambandet (Gw-Q) närmare markytan.



Figur 31. Variationer i månadernas anpassade samband för grundvattenrör T17A i det kalavverkade området.

Grundvattenrör T17C har en väldigt distinkt linje vid en grundvattennivå omkring 25 centimeter under markytan. Detta kommer sig av att loggerns maximala mätnivå uppnåddes och att den därför registrerade samma grundvattennivå trots att grundvattennivån låg närmare markytan. Den modell som anpassades till värdena bedömdes vara acceptabel.

Tidsserien för grundvattenrör T3E hade inte samma respons i ökningen av grundvattennivå vid flödestopparna under 2005 som under 2009 (Figur 32), vilket kan vara en av anledningarna till att Gw_Qmodell-05 och Gw_Qmodell-09 skiljer sig åt.



Figur 32. Tidsserien för transekt T3 2005. Med både manuella och kontinuerliga grundvattennivå mätningar.

De framtagna modellerna i referensområdet visade resultat som inte var förväntade då situationen efter avverkning antogs skulle vara densamma som före avverkningen. Modellerna-09 förväntades följa Gw_Qmodell-05 men med högre vattenförings punkter eftersom nederbörden var större 2009 än 2005. De framtagna resultaten visar på att sambandet hade ändrats till att samma vattenföring efter avverkningen representerar en högre grundvattennivå. Orsaken till detta kan vara de olika nederbördssituationer vilket kan påverka markvattenhalten och möjligtvis markstrukturen och vilket i sin tur kan höja grundvattenytan (Lundin 1979).

Även resultaten för de avverkade områdena visade på samma resultat nämligen att sambandet hade förflyttats närmare markytan. Här kan avverkningen ha en inverkan eftersom höjningen av sambandet är större än för referensområdet. En annan orsak kan vara att bäcken har dämats upp och på så vis påverkat grundvattennivåerna närmast bäcken.

6.3. GRUNDVATTENYTANSLÄGE I MARKEN

Med anledning av att det även i referensområdet har skett en förändring i de marknivåer som var mättade före och efter avverkningen kan inte resultaten för de avverkade områdena i anses vara otvetydiga. Eftersom det har skett en större förändring (speciellt för det kalavverkade området) än för referensområdet kan vissa slutsatser ändå dras. Det krävdes dock att resultaten från referensområdet togs i beaktande vid analysen.

Mellan år 2007 och 2009 hade det skett en liten höjning av grundvattenytan för alla grundvattenrör även de i referensområdet. Detta beror på den ökade avrinningen som dels

kommer sig av avverkningen och dels p.g.a. nederbördsskillnader mellan åren. Ökningen skedde främst i de marknivåer som varit mättade under kortare tid vilket tyder på att det var högre och/eller fler vattenföringstoppar under 2009 än 2007. Ökningen mellan åren 2005 och 2007 beror med största sannolikhet på modellernas utformning, eftersom avrinningen 2007 var något lägre än 2005.

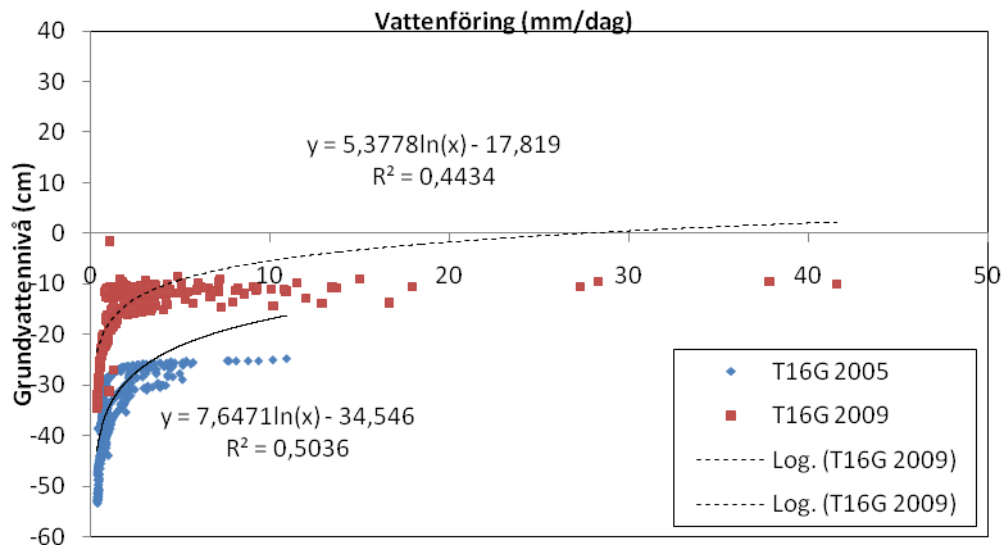
För att kunna dra några slutsatser kring vad som har orsakat höjningen av grundvattenytan före och efter avverkningen, testades olika metoder med vattenföringsdata från 2009 för att undvika att olika nederbördsmängder påverkade resultatet. Effekten av *Effekt-Gw_Qmod* visade på att grundvattenytan igenomsnitt höjdes ungefär lika mycket som vid jämförelse mellan situationen år 2005, 2007 och 2009. Höjningen av grundvattenytan vid test av effekterna av *Effekt-Avr* på grundvattenytans läge i marken visade på att den inte alls hade lika stor effekt på höjningen av grundvattenytan. Detta innebar att det främst var markens struktur som bidrar till den höjda grundvattenytan. Men att den ökade grundvattenbildningen bidrar till att grundvattenytan vid torra perioder låg högre upp i markprofilen. Detta var mer tydligt i det kalavverkade området.

Skillnaden för de lägre markskikten som var mättade under längre tidsperioder i både buffertzonsområde och det kalavverkade området för effekten av *Effekt-Avr* på grundvattennivåerna, berodde på att höjningen av grundvattennivåerna ledde till en ökad vattenföring i bäcken vid låg vattenföring (Sörensen, 2009). Detta innebär att då grundvattennivån var belägen djupare ned i marken höjdes grundvattennivån efter avverkningen till följd av den ökade grundvattenbildningen. Men att det för grundvattennivåerna som låg närmare markytan och då följaktligen vid högre vattenföring var det inte någon större skillnad efter avverkningen jämfört med före avverkningen. Skillnaden mellan juli och oktober månad under 2007 visade på att avverkningen gav en ökad grundvattenbildning eftersom skillnaden mellan månaderna var mycket större (upp till 4cm) för referensområdet jämfört med de avverkade områdena.

Modellerna visade på en ytavrinning för vissa av grundvattenrören. Detta kan vara fullt möjligt i de grundvattenrör som låg närmast vattendraget. Eller för de grundvattenrör exempelvis T3E, T5E och T10G som låg i nederkant av sluttningen och i närheten eller i ett laggdike. Då laggdiket kan ha vuxit igen kan det vara svårt att bestämma vart markytan var belägen. De grundvattenrör där grundvattenytan kan vara belägen ovan marken eftersom de låg nära vattendraget var T5A, T11A, T10B, T16B och T17A. Grundvattenrör T5A svämmades över under vårflo den 2009 då bäckfåran nedströms täpptes till och vattnet tog alternativa vägar. I buffertzonsområde var det enbart T10B och T11A som hade tidsserier som vissa perioder låg ovanför markytan. Dessa grundvattenrör låg nära vattendraget och kan vid höga flöden bli översvämmade då vattenytan stiger i vattendraget. Samma sak gäller även för de grundvattenrör som låg nära vattendraget i det kalavverkade området.

För de diagram som uppvisade att grundvattenytan har legat ovan markytan 2005, 2007 och 2009 kan det vara modellernas anpassning som var den bakomliggande orsaken. Vissa modeller låg högre upp i markprofilen än vad de uppmätta värdena. Exempelvis

grundvattenrör T16G (Figur 33) där de uppmätta värdena endast nådde ca 10 centimeter under markytan medan modellen gav en grundvattenyta över markytan för hög vattenföring.



Figur 33. Grundvattenrör T16G där modellen skiljde sig från de uppmätta värdena.

6.4. FRAMRUNNEN VOLYM GRUNDVATTEN

Diagrammen (Bilaga E) som visar referensområdets framrunna volym grundvatten för åren 2005, 2007 och 2009 visar att både 2007 och 2009 var profilen av grundvattenvolymen i genomsnitt positionerat högre upp i markprofilen än 2005. År 2005 hade dock en större maximal volym grundvatten. Utifrån detta kan man inte säga så mycket för de andra grundvattenrören, eftersom det hade skett förändringar antingen i marken vart den mesta volymen grundvatten transporterades. En anledning kan vara att en större andel vatten transporteras djupare ned i skogbeväxt mark än i kalhuggen mark, men eftersom 2009 var ett blött år kan inte allt vatten transporteras djupare ned utan flödet kan ligga ytligare än 2005 i referensområdet. 2007 års resultat kan bero på att avrinningen var mindre vilket kan ha gjort att det inte var några större volymer som behövdes transporterats högre upp i marken.

De kalavverkade områdena hade en höjning av den maximala volym grundvatten vilket var förväntat för perioden efter avverkningen. Resultaten visar upp ett mycket mer förväntat och mer sannolikt samband mellan åren 2005, 2007 och 2009 och där skillnaden var mycket tydligare för det kalavverkade området än för buffertzonsområdet.

Vid undersökningen av de olika metoderna för volymen framrunnet grundvatten gavs det ett bättre resultat i referensområdet vilket gjorde att de andra resultaten har kunnat jämföras. Även här hade modellerna en påverkan på utgången av det volymerna framrunnet grundvatten. För de avverkade områdena hade den förändring som skett genom höjningen av de framrunna volymerna i markprofilen härledas till effekterna av *Effekt-Avr.* Medan den ökade avrinningen enbart bidrar med en ökad maximal volym på varje marknivå. En orsak till skillnaderna i volymen grundvatten som runnit fram för både grundvattenrör T11A och T16D kan vara att beräkningen endast tar hänsyn till att grundvattenröret förses med vatten från en meter brett område rakt ovanför grundvattenröret. Det område som förser grundvattenröret med grundvatten kan i sig vara mycket större än det som beräkningarna antar. Både det intervall där grundvattenytan fluktuerar och de inverterade grundvattenmodellerna bidrar till skillnaderna i framrunnen volym grundvatten. Ett snabbare avtagande leder till en mindre volym grundvatten vid lägre marknivåer. Det ger även ett intervall som ligger djupare ned i markprofilen. Skillnaderna för grundvattenrör T11A och T16D kan då förklaras av både den inverterade modellen och att grundvattenytan låg närmare markytan efter avverkningen.

Placeringen av grundvattenrören i referensområdet hade kunnat göras annorlunda. Genom att t.ex. placera en av transekterna på östra sidan bäcken som domineras av mineraljord och inte i den torv som finns där de är placerade nu. Detta kan även ha påverkat resultaten i transekterna T10 och T11 som är belägna på samma sida av bäcken som transekterna T3 och T5, medan transekterna T16 och T17 är belägna på en annan plats med huvudsakligen mineraljord som beter sig annorlunda hydrologiskt jämfört med torv.

7. SLUTSATSER

De slutsatser som man kan dra från den här studien var att det inte var den ökade grundvattenbildningen som bidrog till den ökade grundvattennivå och mer ytliga flödesvägar. I stället var det förändringen i sambandet mellan grundvattennivån och vattenföringen som bidrog till en höjd grundvattenyta och som i sin tur ledde till en mer yttlig avrinning. Detta innebär att markens struktur eller hydrologiska egenskaper har ändrats för åren efter avverkning. Den största effekten verkar kalavverkade området (CC) uppvisa, medan buffertzonsområdet (BS) visar på en mindre ökning av grundvattennivån. Även referensområdet hade en lite förändring i sambandet men inte alls i samma omfattning som de avverkade områdena.

Vidare verkar det ske en större höjning av grundvattenytan i mineraljord än i torv, där torv verkar vara mer ostabil och föränderlig mellan åren. Därför skulle en av transekterna i referensområdet ha placerats på östra sidan av vattendraget för att en mera pålitlig jämförelse skulle ha kunnats göras mellan det kalavverkade området och referensområdet.

Fortsatta studier inom skogsavverkningens påverkan på grundvattnets flödesvägar skulle vara att undersöka markens egenskaper för att få en bättre förståelse om hur dessa förändras vid avverkning. En annan angreppsvinkel skulle kunna vara att undersöka hur nederbördsvariationer påverkar infiltration och markstruktur efter avverkning.

8. LITTERATURFÖRTECKNING

- Alexandersson, H., Karlström C., Larsson-McCann S., 1991. Temperature and precipitation in Sweden 1961-90: Reference normals. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping
- Bishop, K. (1991). *Episodic Increases in stream acidity, Catchment flow pathways and hydrograph separation*. Univ. of Cambridge Doctoral Dissertation. Cambridge.
- Eriksson, J., Nilsson, I., & Simonsson, M. (2005). *Wiklanders Marklära*. Lund: Studentlitteratur.
- Gillham, R. (1984). The Capillary fringe and its effect on water-table response. *Journal of hydrology* Vol 67 , 307-324.
- Gradin, U. (2003). *Dataanalys och hypotesprövning för statistikanvändare*. Uppsala: Naturvårdsverket.
- Grip, H., & Rodhe, A. (2003). *Vattnets väg från regn till bäck*. Uppsala: Hallgren och Fallgren Studieförlag AB.
- Haglund, C. (2009). *Skogsavverkningens påvekan på vattnets strömningsvägar i jord*. Uppsala. UPTec W09 033. Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet miljö- och vattenteknik, Uppsala universitet.
- Högbom. (2009). *Site description and background, manuscript*. Uppsala.
- Intech instruments LTD. (2005). Hämtat från <http://www.trutrack.com/intech/WT-HR.html>. den 2009-09-02
- Kendall, K., Shanley, J., & McDonnell, J. (1999). A hydrometric and geochemical approach to test the transmissivity feedback hypothesis during snowmelt. *Journal of Hydrology* , 188-205.
- Laudon, H., Hedtjärn, J., Schelker, J., Bishop, K., Ågren, A., & Sörensen, R. (2009). Response of dissolved organic carbon (DOC) following forest harvesting in a boreal forest. *Ambio: A Journal of the Human Environment* Vol. 38. No 7 pp , pp. 381-386.
- Lundin, L. (1979). *Kalhuggningens inverkan på markvattenhalt och grundvattennivå*. Uppsala: Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära, Institutionen för skoglig marklära.
- Monteith, S. S., Buttle, J. M., Hazlett, P. W., Beall, F. D., Semkin, R. G., & Jeffries, D. S. (2006). Paired-basin comparison of hydrological response in harvested and undisturbed hardwood forests during snowmelt in Central Ontario: I. Streamflow, groundwater and flowpath behaviour. *Hydrological processes*, 20 .
- Ring, E., Löfgren, S., Högbom, L., & Goedkoop, W. (2008). *Skogsbruk och vatten en kunskapsöversikt*. Uppsala: Skogforsk.

Rodhe, A. (1989). On the Generation of Stream Runoff in Till Soils. *Nordic Hydrology Vol 20* , 1-8.

Sandberg, G. (2003). *Kunskap direkt*. Hämtad 2009-10-12, from www.kunskapdirekt.se

Seibert, J., Bishop, K., Rodhe, A., & McDonnell, J. (2003). Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis. *Water Resources Research vol 39* .

Seibert, J., Grabs, T., Laudon, H., Winterdahl, M., & Bishop, K. (2009). Technical Note: Linking soil- and stream-water chemistry based on a riparian flow-concentration integration model. *Hydrology and earth system Sciences Discussion* , 5603-5629.

Sveriges geologiska undersökning. (2009). *Sveriges geologiska undersökning*. Hämtad 2009-10-23, från SGU:s kartgenerator: <http://www.sgu.se/sgu/sv/index.html>

Sörensen, R. (2009). *Influence of Topography and Forestry on Catchments: Soil properties, Runoff Regime, and Mercury Outputs*. Doctoral Thesis No. 2009:85, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences.

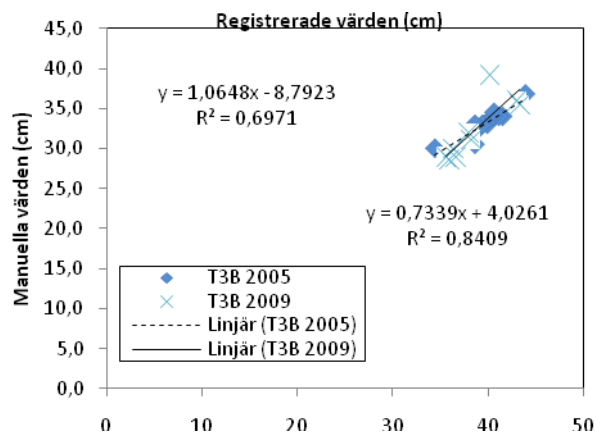
Muntliga källor:

Schelker, J. (2009, Oktober). Doktorand, Institutionen för skogens ekologi och skötsel SLU Umeå.

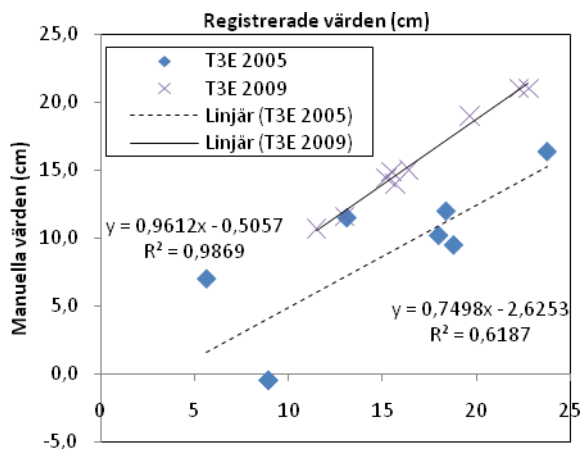
BILAGA A. Kalibreringsdiagram

Kalibreringsdiagrammen för grundvattenrören för åren 2005 och 2009

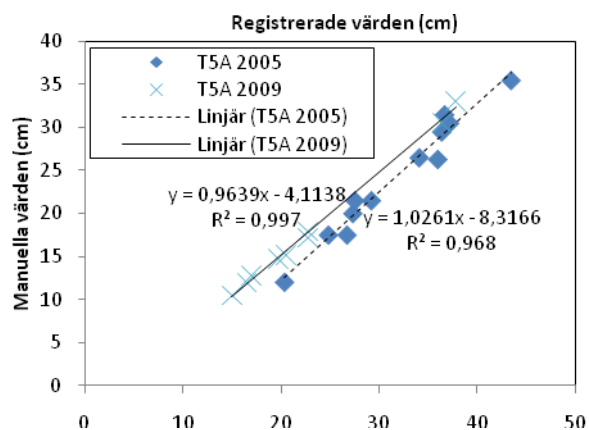
T3B



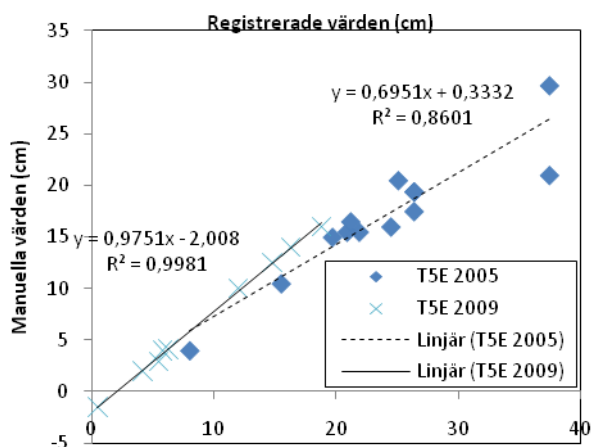
T3E



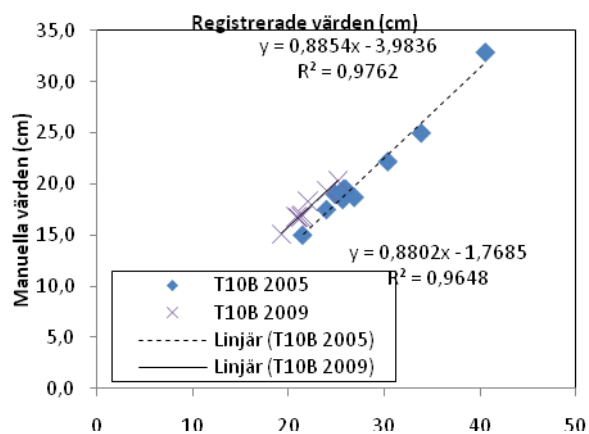
T5A



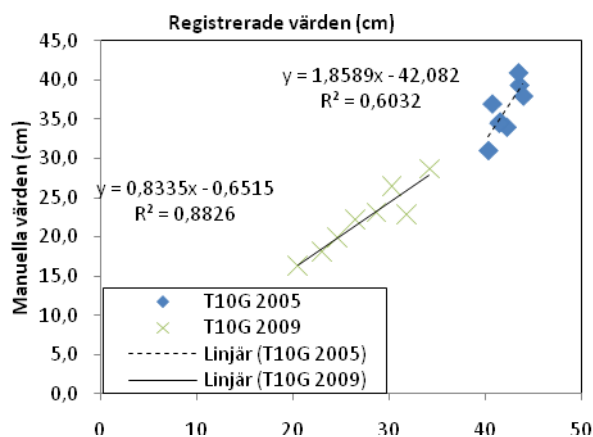
T5E



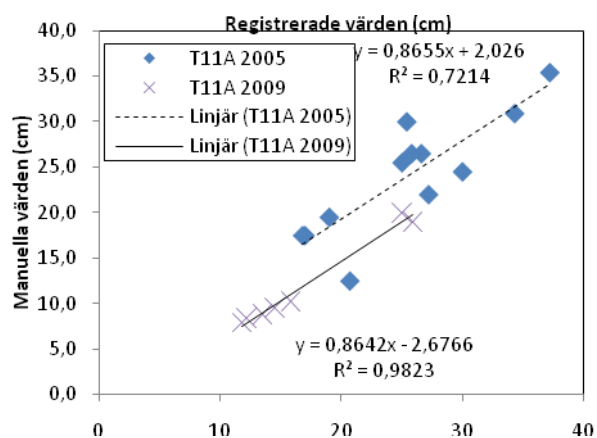
T10B



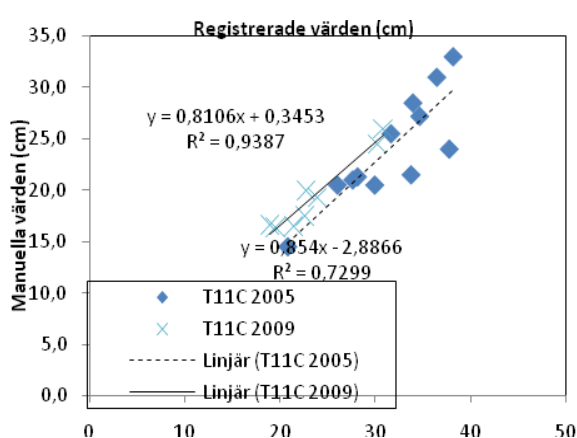
T10G



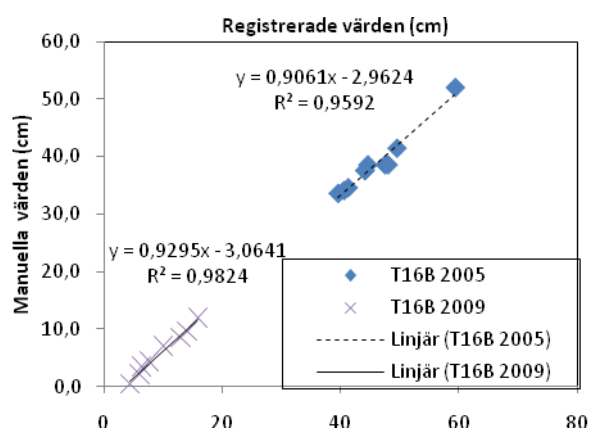
T11A



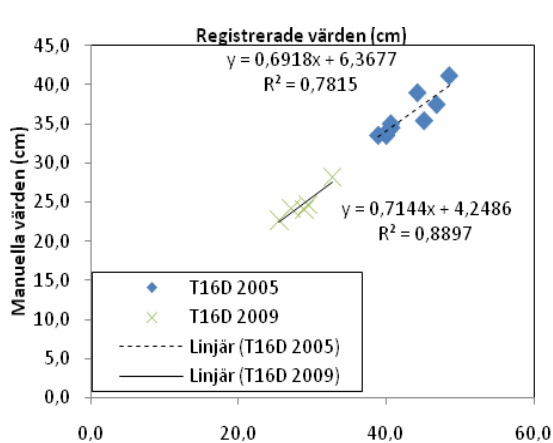
T11C



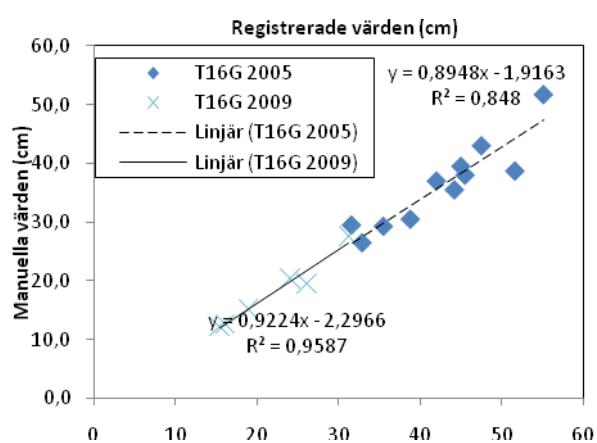
T16B



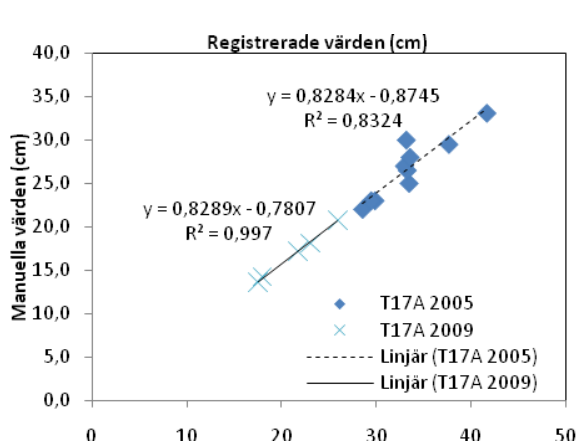
T16D



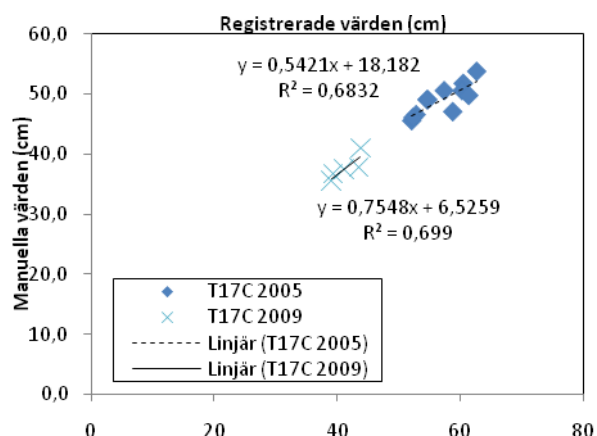
T16G



T17A



T17C



BILAGA B. Kalibreringsfunktioner

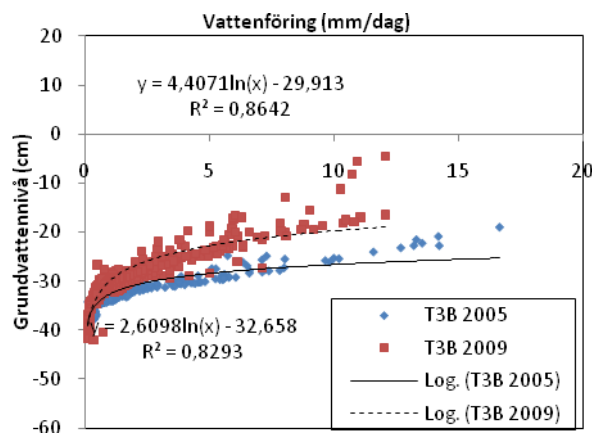
Kalibrerings funktioner med riktningskoefficienterna för år 2005 och 2009.

	2005	2009	2005	2009
T3B	$y = 0,7339x + 4,0261$	$y = 1,0648x - 8,7923$	0,841	0,697
T3E	$y = 0,7498x - 2,6253$	$y = 0,9612x - 0,5057$	0,619	0,987
T5A	$y = 1,0261x - 8,3166$	$y = 0,9639x - 4,1138$	0,968	0,997
T5E	$y = 0,6951x + 0,3332$	$y = 0,9751x - 2,008$	0,860	0,998
T10B	$y = 0,8854x - 3,9836$	$y = 0,8802x - 1,7685$	0,976	0,965
T10G	$y = 1,8589x - 42,082$	$y = 0,8335x - 0,6515$	0,603	0,883
T11A	$y = 0,8655x + 2,026$	$y = 0,8642x - 2,6766$	0,721	0,982
T11C	$y = 0,854x - 2,8866$	$y = 0,8106x + 0,3453$	0,730	0,939
T16B	$y = 0,9061x - 2,9624$	$y = 0,9295x - 3,0641$	0,959	0,982
T16D	$y = 0,6918x + 6,3677$	$y = 0,7144x + 4,2486$	0,782	0,890
T16G	$y = 0,8948x - 1,9163$	$y = 0,9224x - 2,2966$	0,848	0,959
T17A	$y = 0,8284x - 0,8745$	$y = 0,8289x - 0,7807$	0,832	0,997
T17C	$y = 0,5421x + 18,182$	$y = 0,7548x + 6,5259$	0,683	0,699

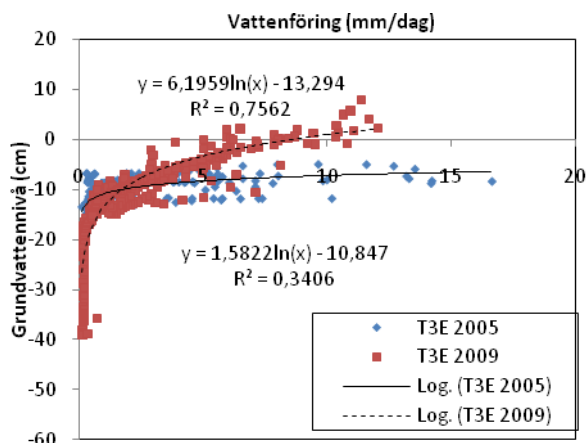
BILAGA C. Grundvattemodeller

Modelldiagram för grundvattenrör under 2005 och 2009

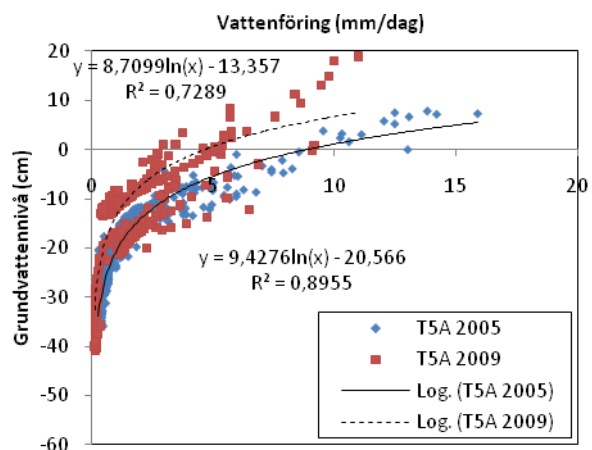
T3B



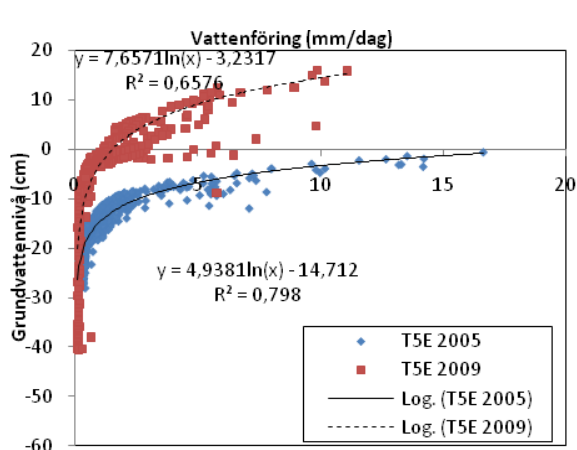
T3E



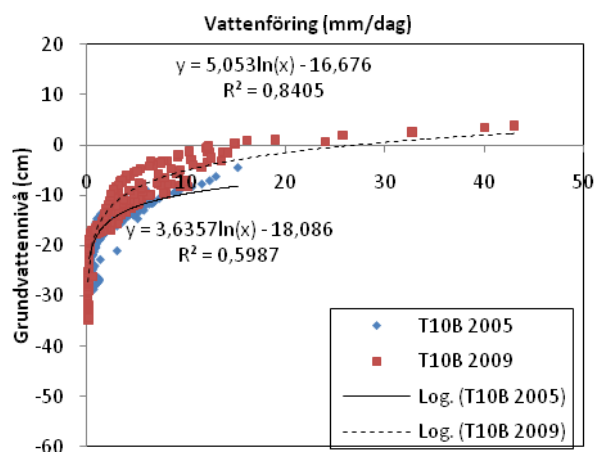
T5A



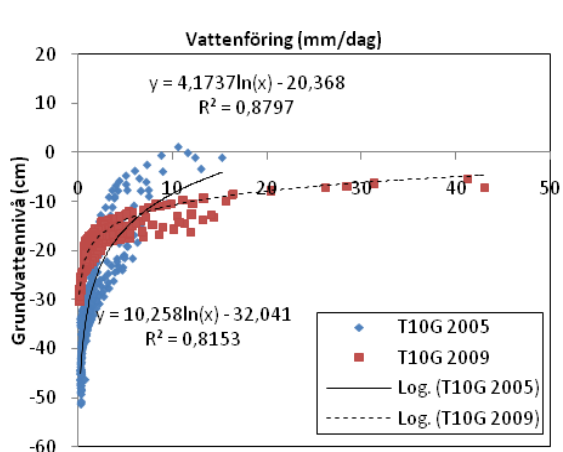
T5E

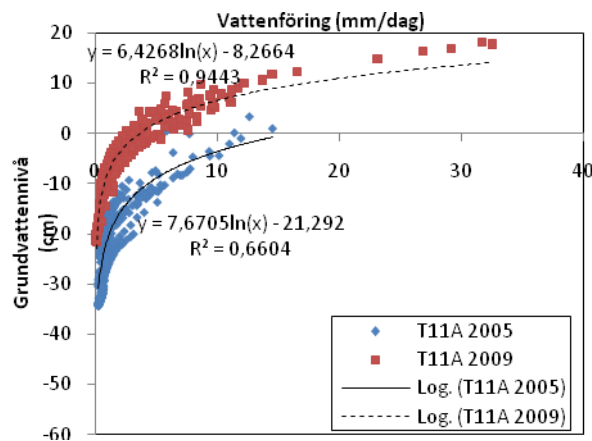
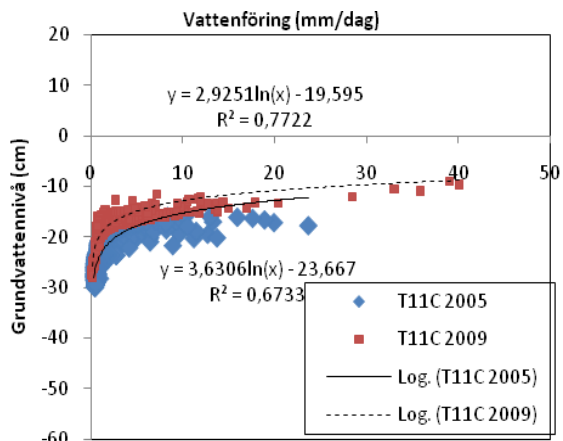
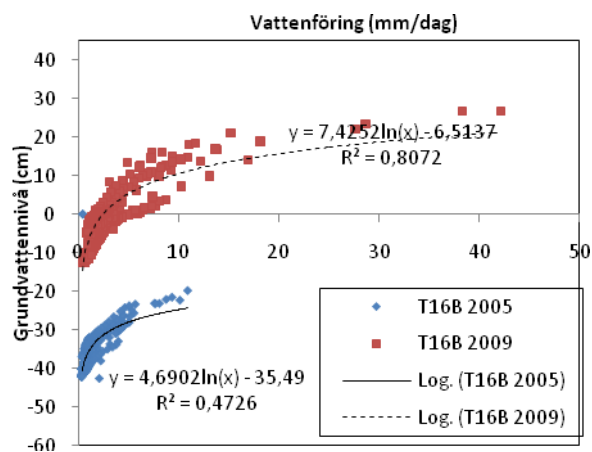
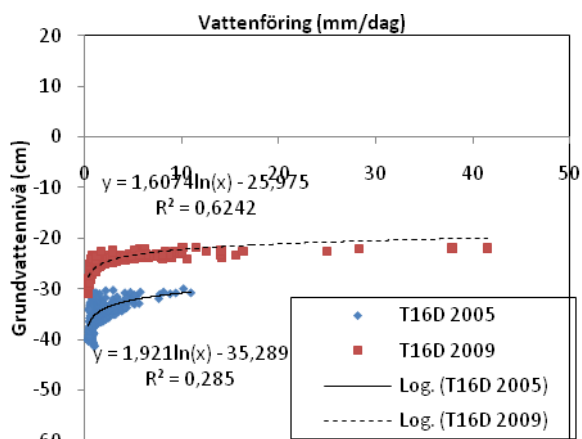
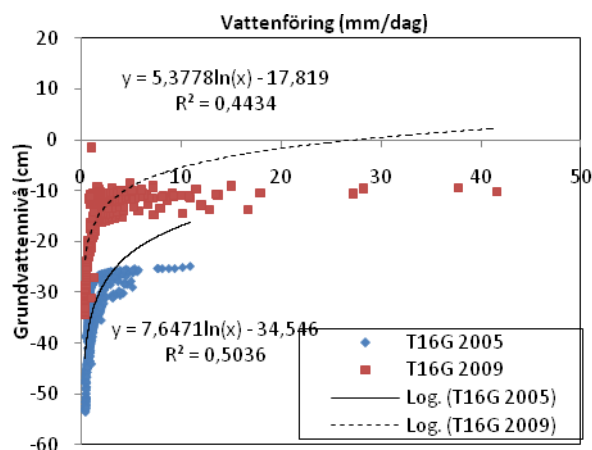
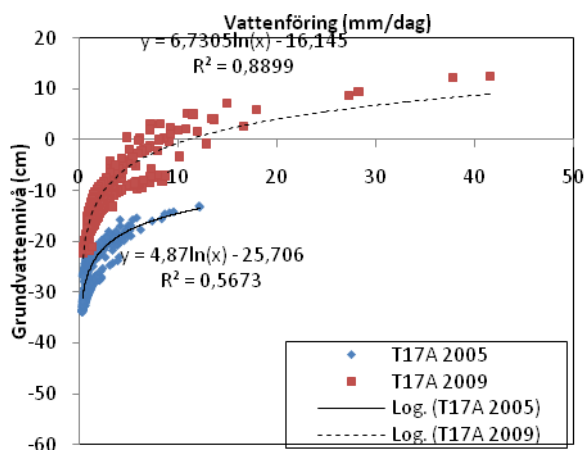


T10B

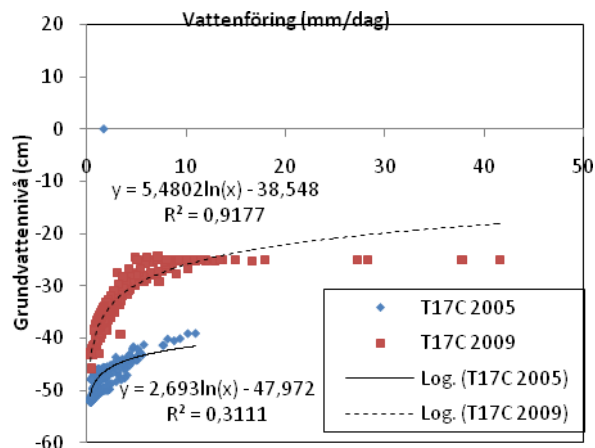


T10G



T11A**T11C****T16B****T16D****T16G****T17A**

T17C



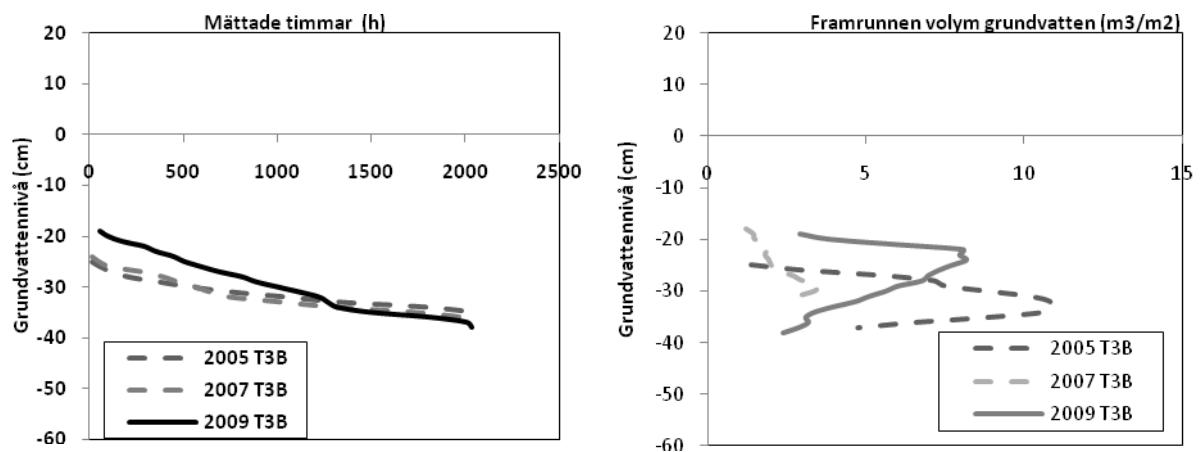
BILAGA D. Grundvattenmodells funktioner

Modellfunktioner för grundvattenrören under 2005 och 2009

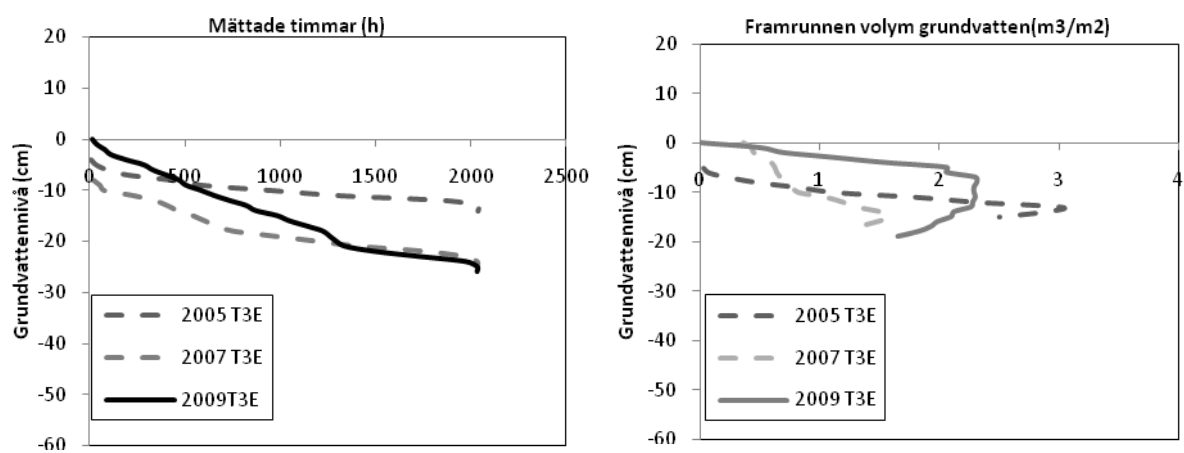
	2005	2009	2005	2009
T3A	$y = 2,609\ln(x) - 32,65$	$y = 4,4071\ln(x) - 29,913$	$R^2 = 0,829$	$R^2 = 0,8642$
T3E	$y = 1,5822\ln(x) - 10,847$	$y = 6,1959\ln(x) - 13,294$	$R^2 = 0,3406$	$R^2 = 0,7562$
T5A	$y = 9,427\ln(x) - 20,56$	$y = 8,7099\ln(x) - 13,357$	$R^2 = 0,895$	$R^2 = 0,7289$
T5E	$y = 4,938\ln(x) - 14,71$	$y = 7,6571\ln(x) - 3,2317$	$R^2 = 0,798$	$R^2 = 0,6576$
T10B	$y = 3,6357\ln(x) - 18,086$	$y = 5,053\ln(x) - 15,626$	$R^2 = 0,5987$	$R^2 = 0,8405$
T10G	$y = 10,258\ln(x) - 29,909$	$y = 3,9888\ln(x) - 20,8$	$R^2 = 0,8153$	$R^2 = 0,9142$
T11A	$y = 7,1993\ln(x) - 22,98$	$y = 6,4268\ln(x) - 8,2664$	$R^2 = 0,6673$	$R^2 = 0,9443$
T11C	$y = 3,6306\ln(x) - 23,667$	$y = 2,925\ln(x) - 19,59$	$R^2 = 0,6733$	$R^2 = 0,772$
T16B	$y = 4,6902\ln(x) - 35,49$	$y = 7,4308\ln(x) - 8,0984$	$R^2 = 0,4726$	$R^2 = 0,8858$
T16D	$y = 1,921\ln(x) - 35,289$	$y = 1,6074\ln(x) - 25,975$	$R^2 = 0,285$	$R^2 = 0,6242$
T16G	$y = 7,6471\ln(x) - 34,546$	$y = 5,3778\ln(x) - 17,819$	$R^2 = 0,5036$	$R^2 = 0,4434$
T17A	$y = 4,87\ln(x) - 25,706$	$y = 6,7305\ln(x) - 16,145$	$R^2 = 0,5673$	$R^2 = 0,8899$
T17C	$y = 2,693\ln(x) - 47,972$	$y = 5,4802\ln(x) - 38,548$	$R^2 = 0,3111$	$R^2 = 0,9177$

BILAGA E. Grundvattenytans läge och framrunnen volym grundvatten, Årsvis
 Grundvattensituationen med antalet mättade timmar (högra) och det laterala flödet (vänstra) för åren 2005, 2007 och 2009.

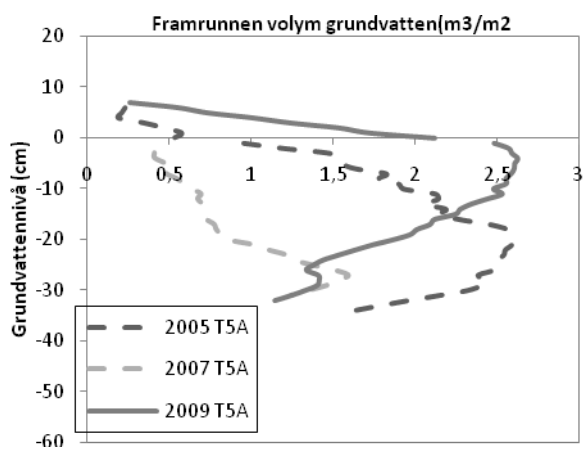
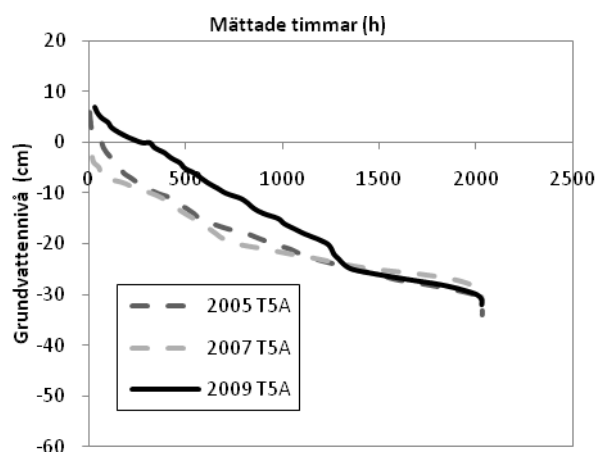
T3B



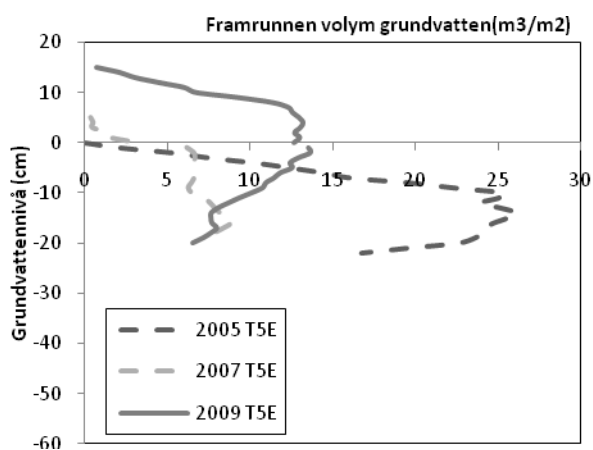
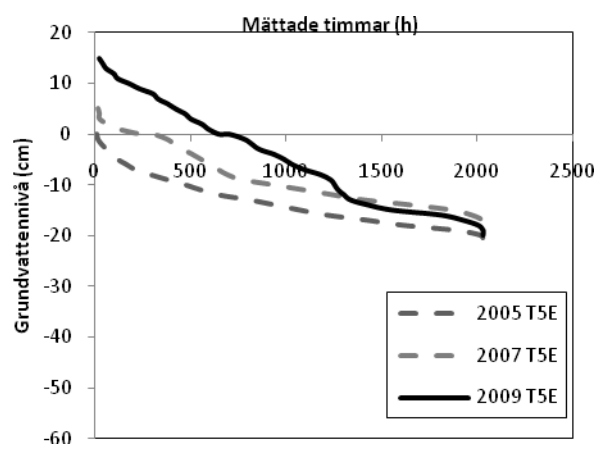
T3E



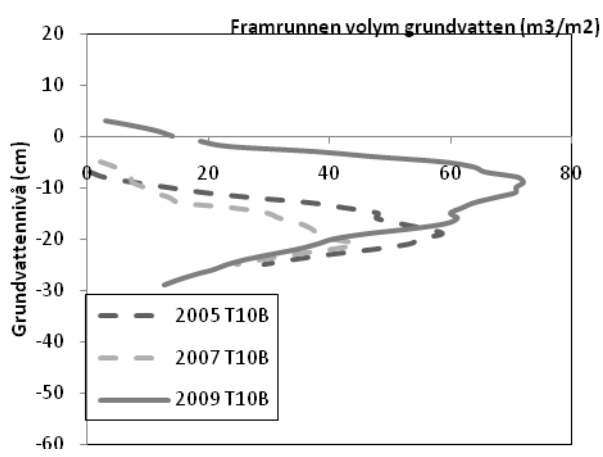
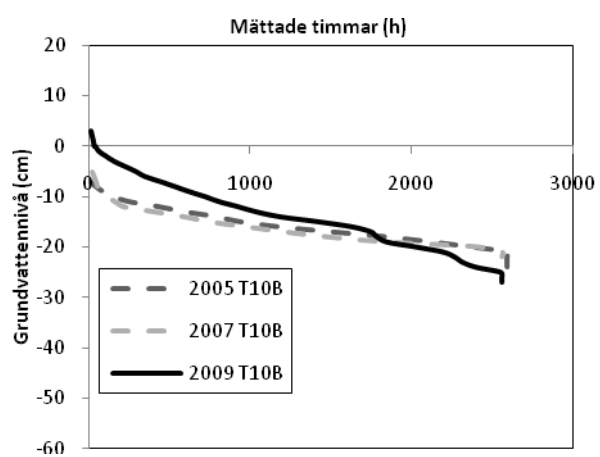
T5A



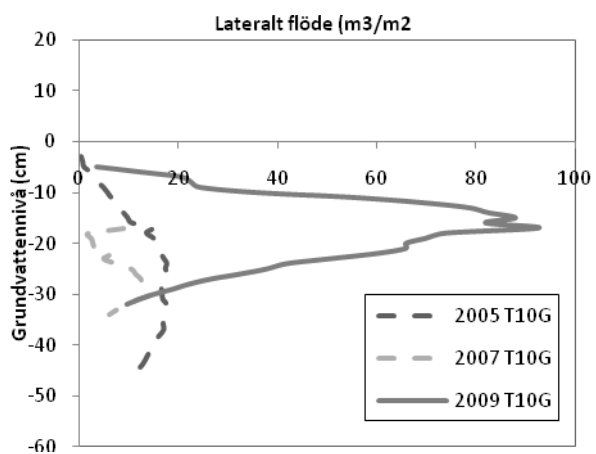
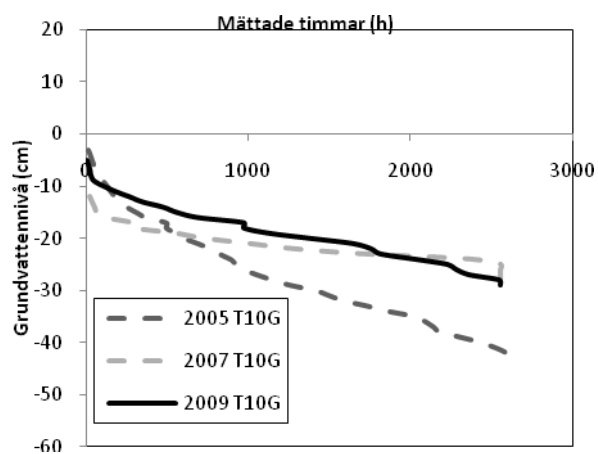
T5E



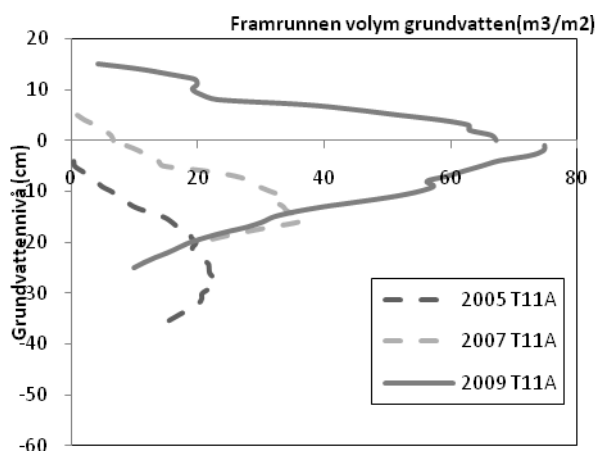
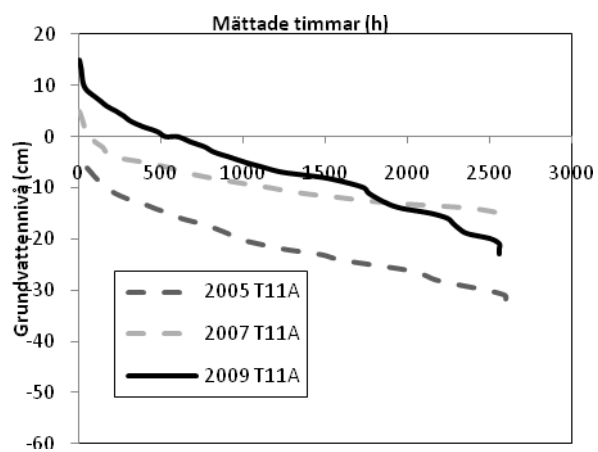
T10B



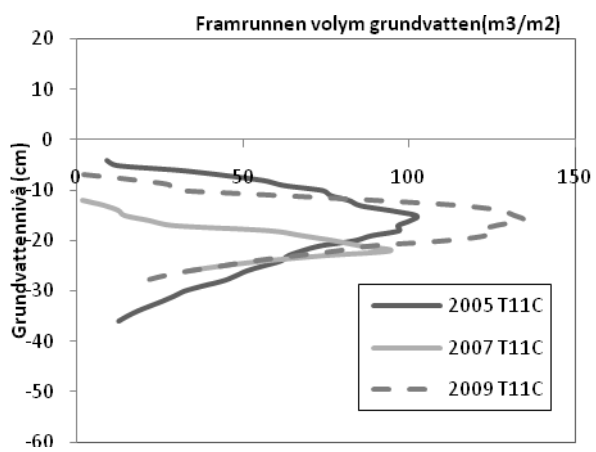
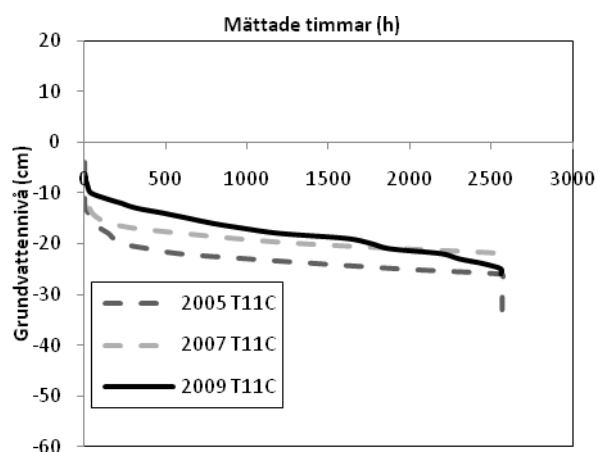
T10G



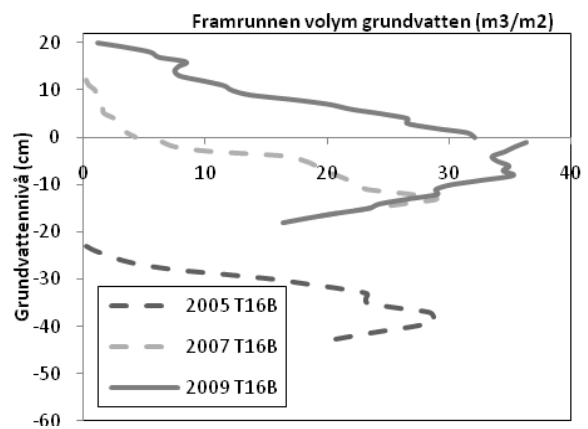
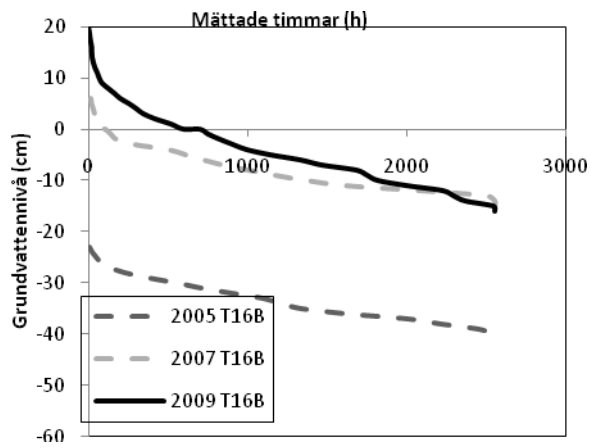
T11A



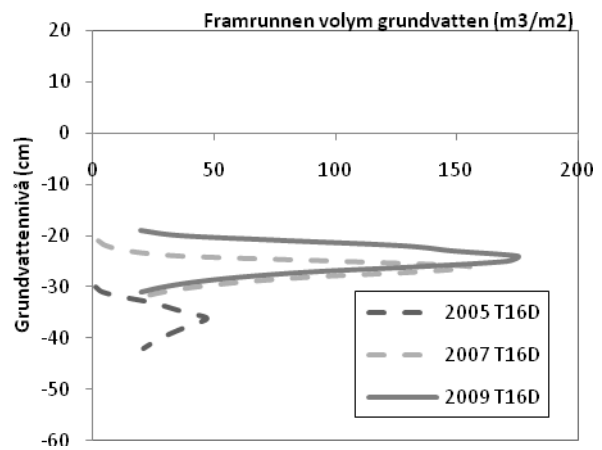
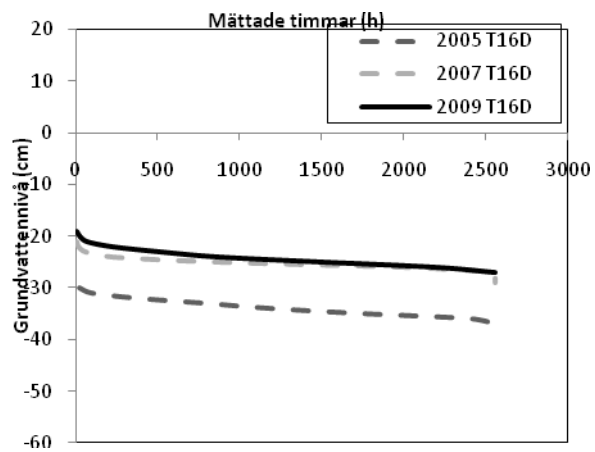
T11C



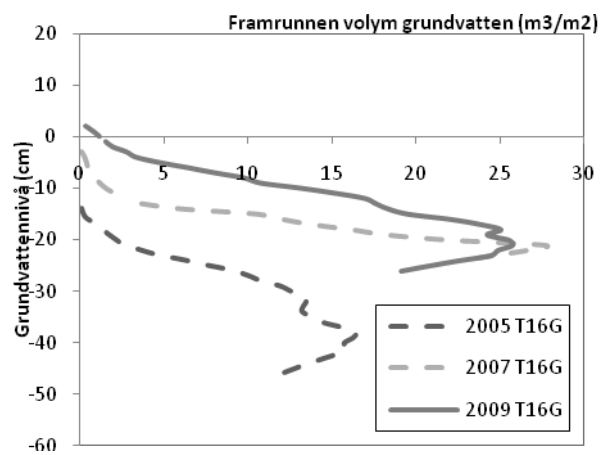
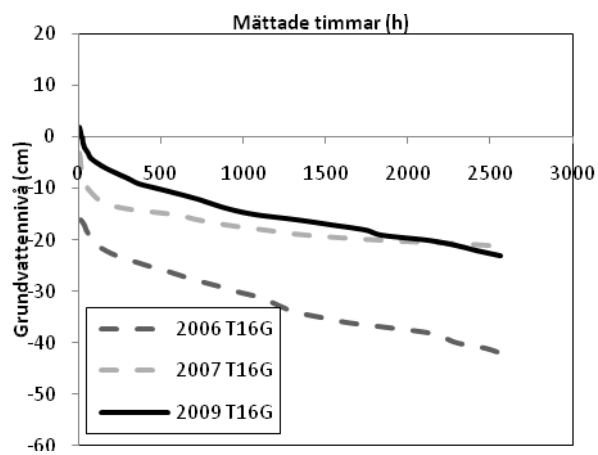
T16B



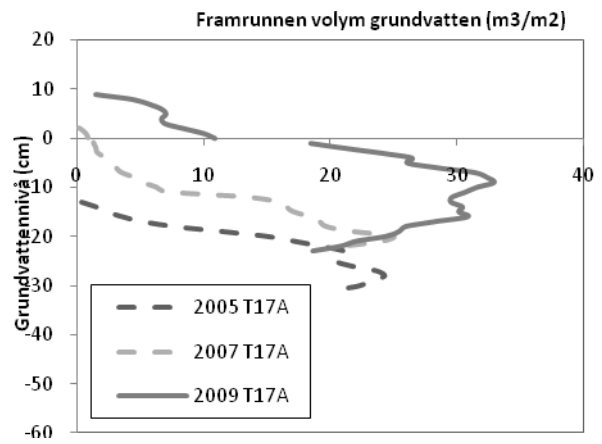
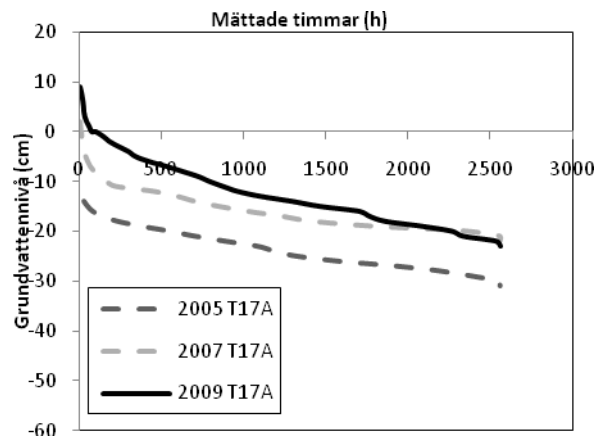
T16D



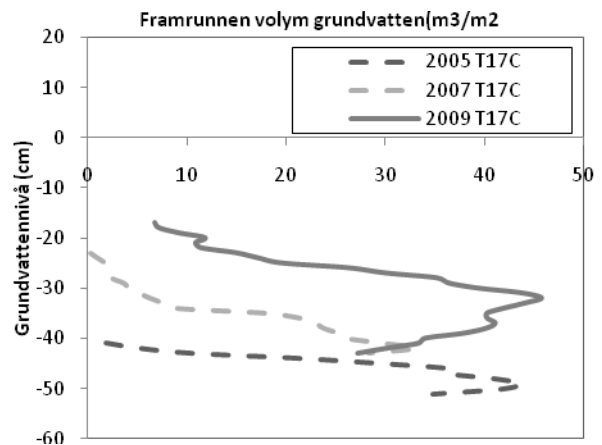
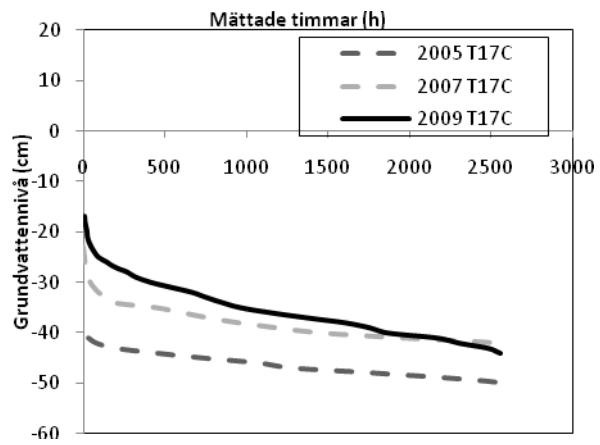
T16G



T17A



T17C



BILAGA F. Sammanställning av resultat för 2005, 2007 och 2009

Tabell över medelvärde på grundvattenytan, intervallet där grundvattenytan fluktuerade inom, den maximala framrunna volymen grundvatten och nivån för den maximala volymen för åren 2005, 2007 och 2009.

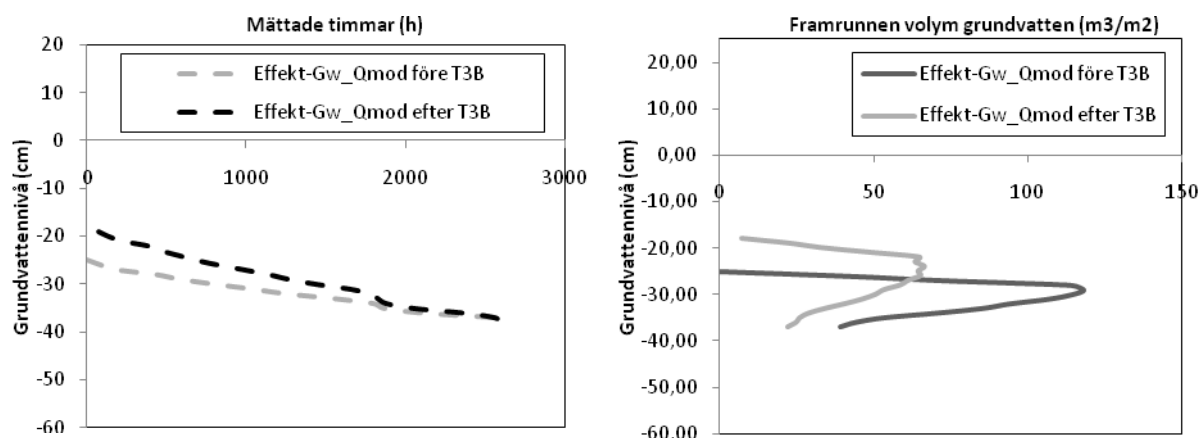
	Medelvärde (cm)			Intervall (cm)			Volym (m ³ /m ²)			Nivå (cm)		
	2005	2007	2009	2005	2007	2009	2005	2007	2009	2005	2007	2009
T3B	-32,4	-32,9	-30,6	6,1	9,0	14,8	10,8	3,4	8,2	-32,0	-35,0	-24,0
T3E	-10,7	-18,9	-15,9	4,9	11,6	19,1	3,0	1,6	2,3	-12,0	-23,0	-8,0
T5A	-20,0	-20,7	-15,9	22,0	18,5	30,4	2,6	1,6	2,6	-20,0	-27,0	-4,0
T5E	-14,6	-9,7	-5,4	11,8	16,2	26,7	26,2	8,9	13,6	-14,0	-16,0	-2,0
T10B	-16,0	-17,4	-14,9	8,9	7,5	18,3	58,6	44,5	71,9	-19,0	-21,0	-9,0
T10G	-28,4	-22,2	-20,2	25,2	6,0	14,4	17,7	14,4	92,7	-26,0	-30,0	-17,0
T11A	-21,9	-10,6	-7,3	17,7	9,6	23,2	23,0	36,8	74,8	-28,0	-15,0	-1,0
T11C	-24,1	-20,4	-18,8	5,1	4,5	10,9	102,2	94,4	134,4	-15,0	-22,0	-16,0
T16B	-34,6	-9,2	-5,5	10,3	9,6	19,0	28,7	29,0	36,4	-39,0	-13,0	-1,0
T16D	-34,9	-26,2	-25,4	4,2	2,1	4,1	46,9	154,3	175,3	-36,0	-26,0	-25,0
T16G	-33,1	-18,9	-15,9	16,8	7,1	13,8	16,4	27,7	25,8	-38,0	-21,0	-21,0
T17A	-24,8	-17,2	-13,8	10,7	8,7	17,2	24,3	25,0	32,9	-28,0	-20,0	-9,0
T17C	-47,4	-39,4	-36,6	5,9	7,1	14,0	43,7	33,0	45,7	-49,0	-42,0	-32,0

BILAGA G. Grundvattenytans läge och framrunnen volym grundvatten, Metoder

Tester av orsaker till skillnaderna i grundvattensituationen, *Effekt-Tot*, *Effekt-Gw_Qmod* och *Effekt-Avr* för varje enskilt grundvattenrör.

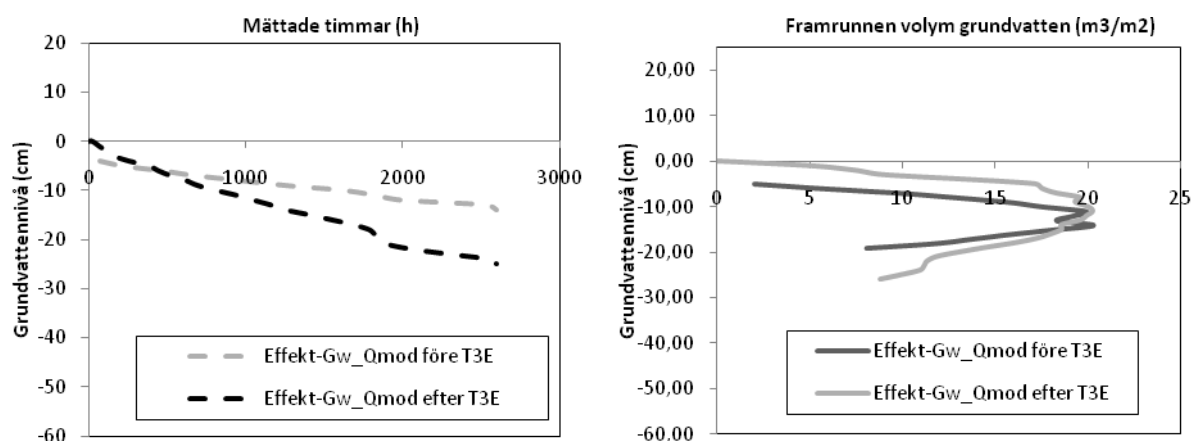
T3B

Effekt-Gw_Qmod



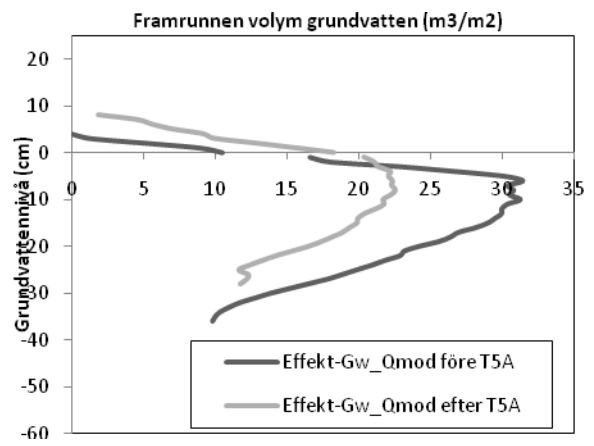
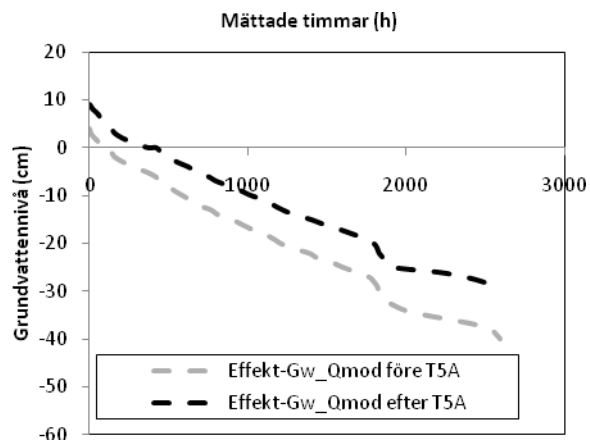
T3E

Effekt-Gw_Qmod



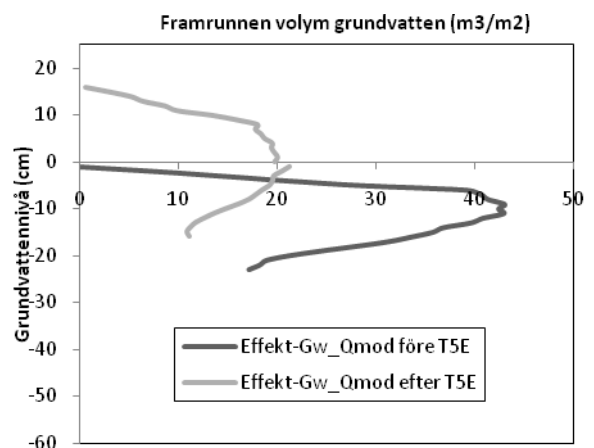
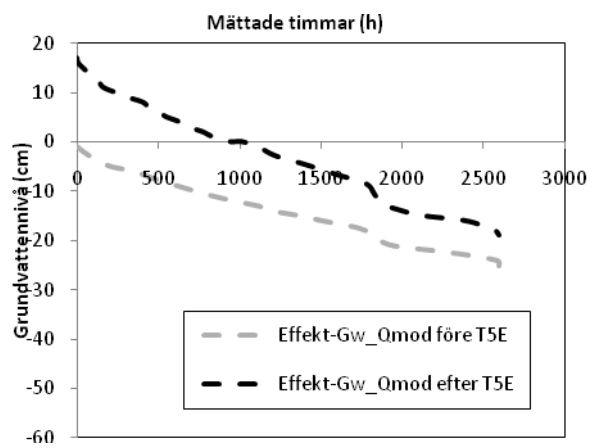
T5A

Effekt-Gw_Qmod



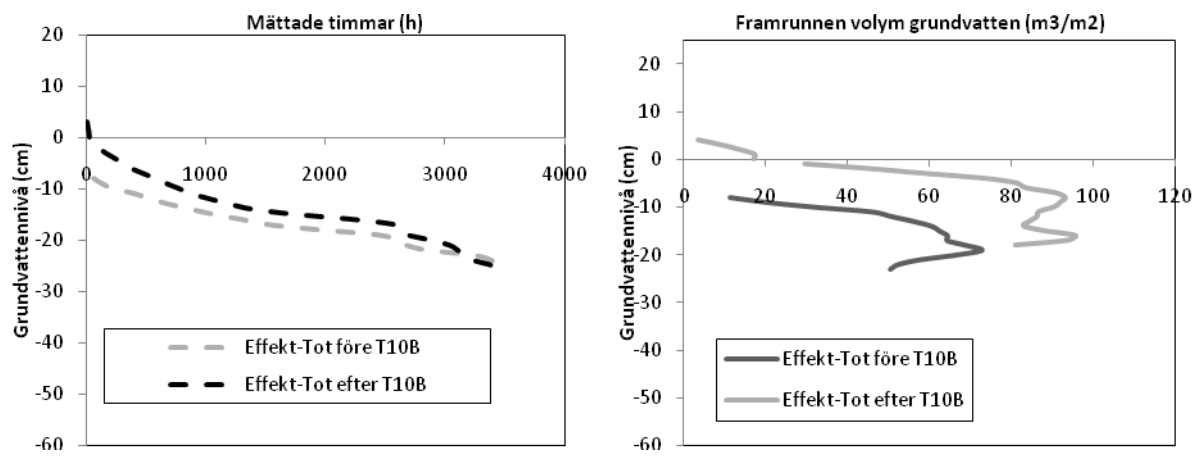
T5E

Effekt-Gw_Qmod

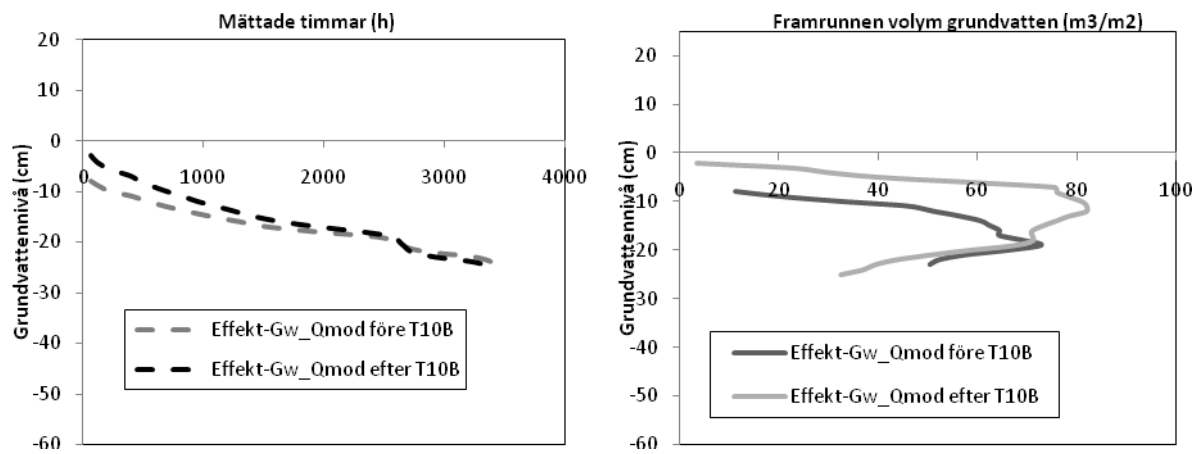


T10B

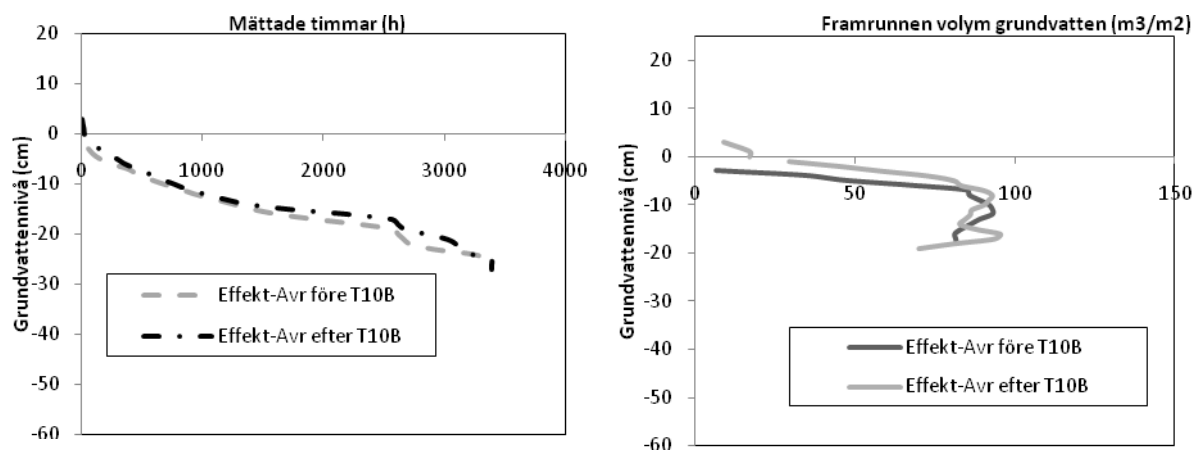
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

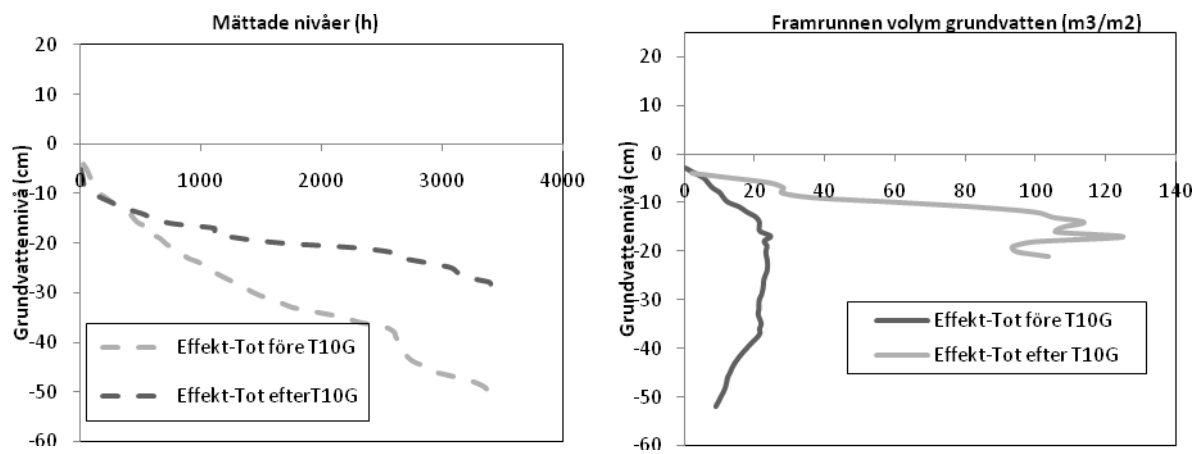


Effekt-Avr

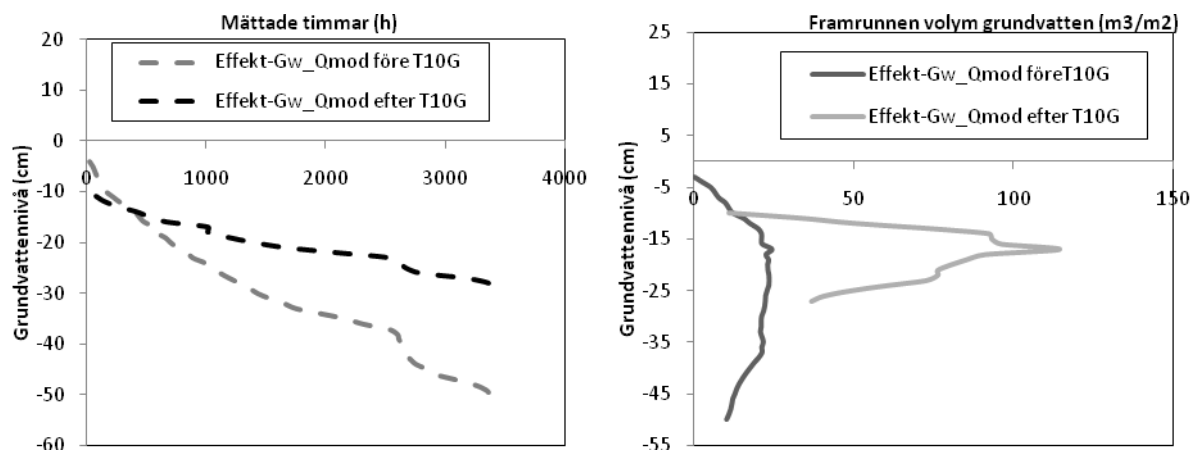


T10G

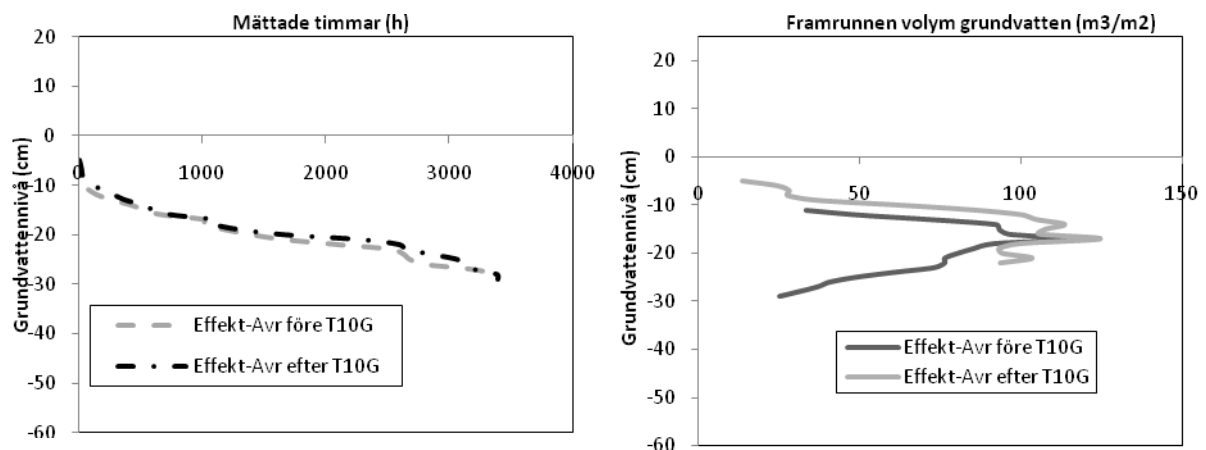
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

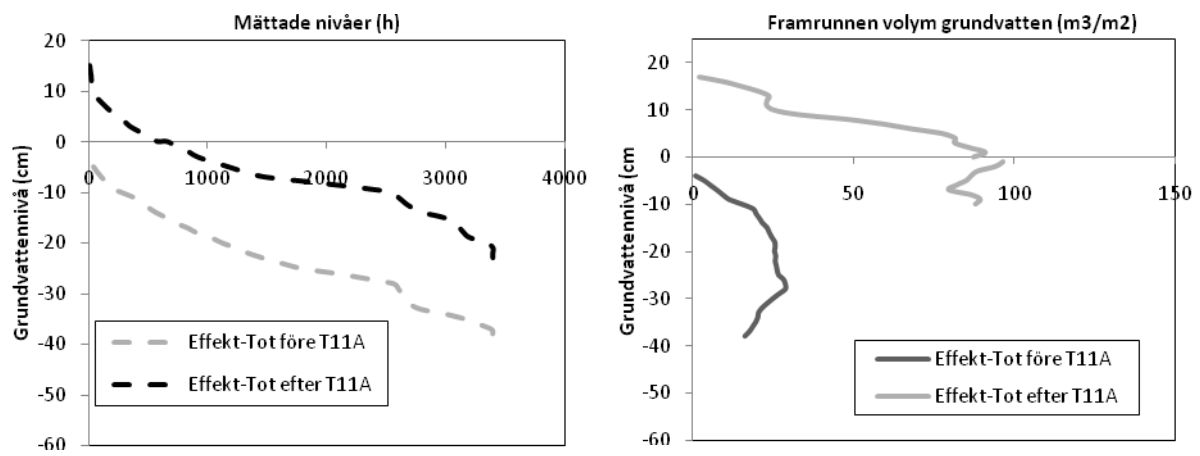


Effekt-Avr

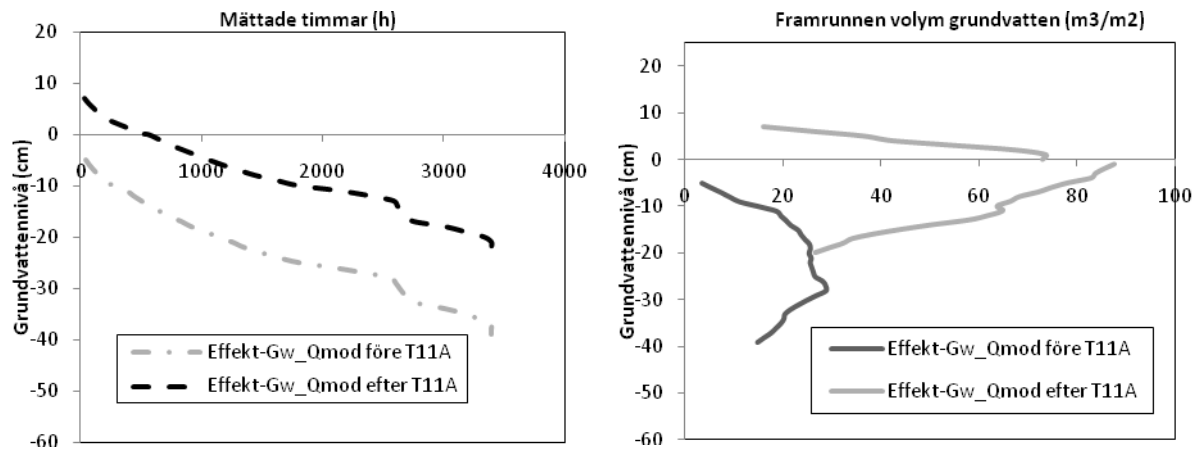


T11A

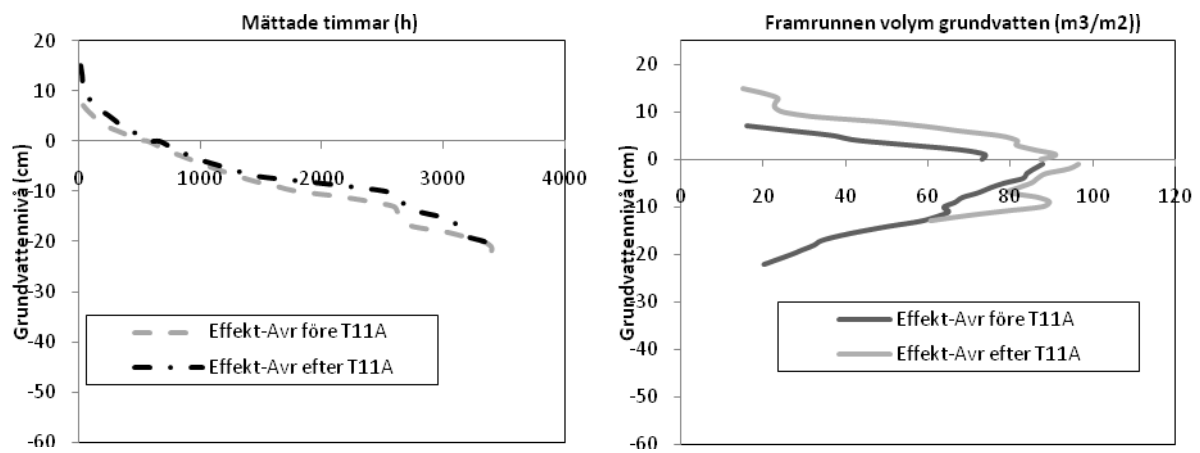
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

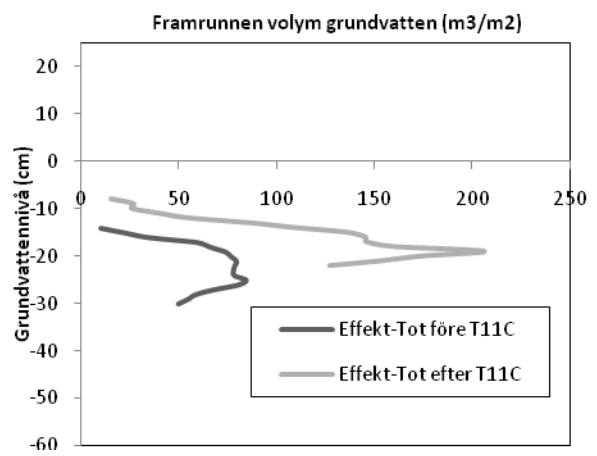
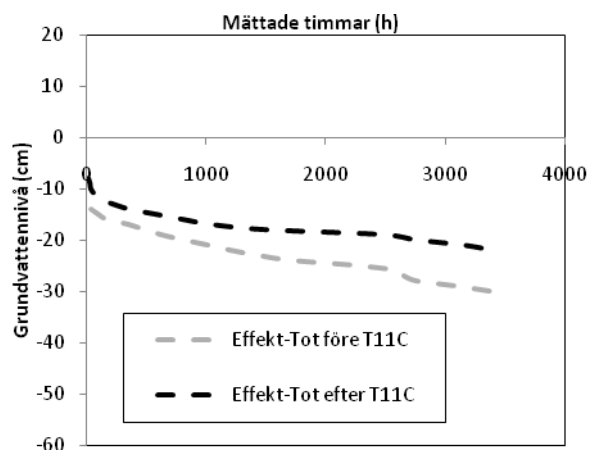


Effekt-Avr

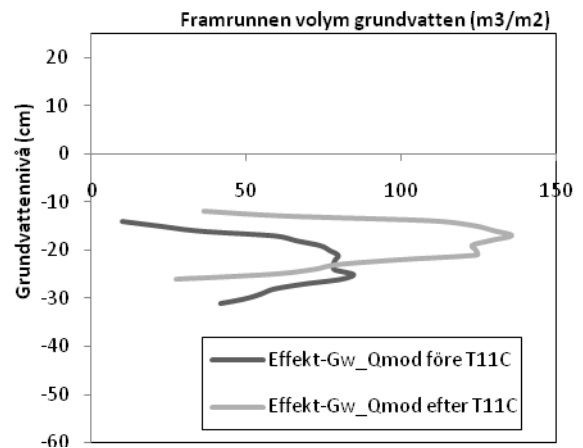
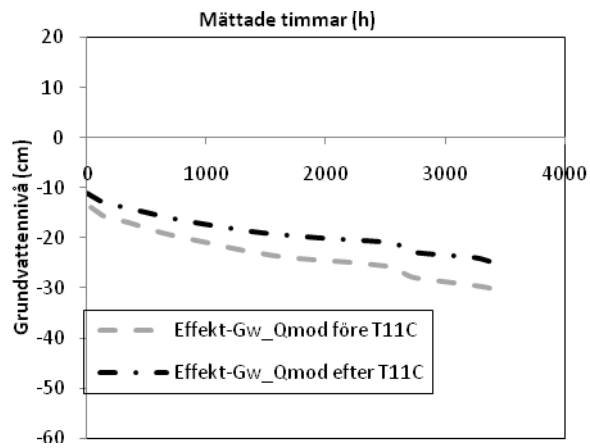


T11C

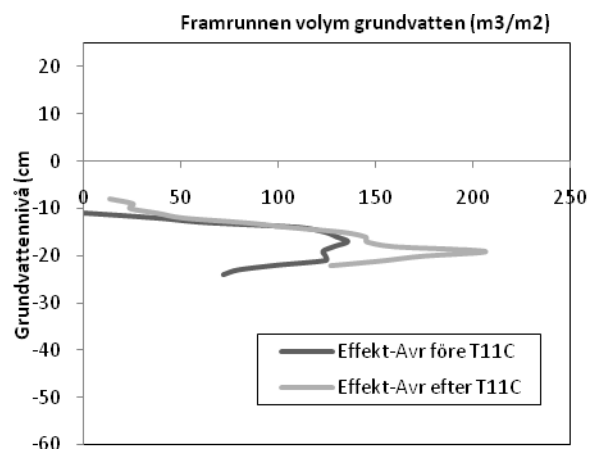
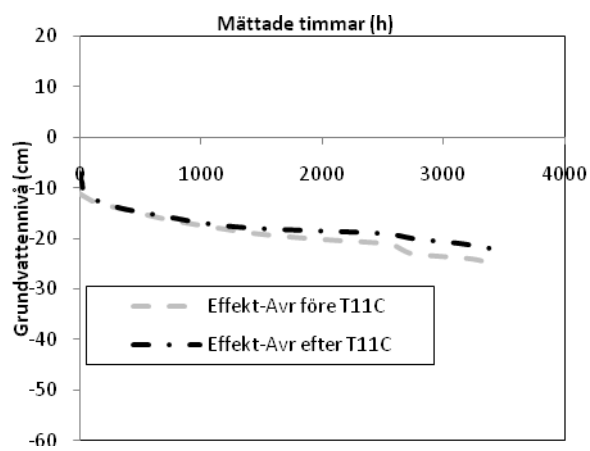
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

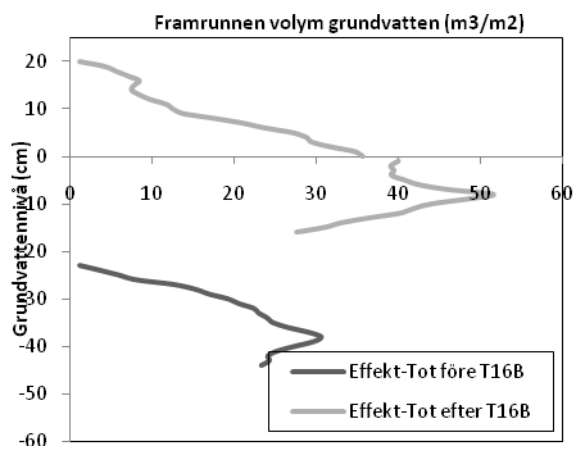
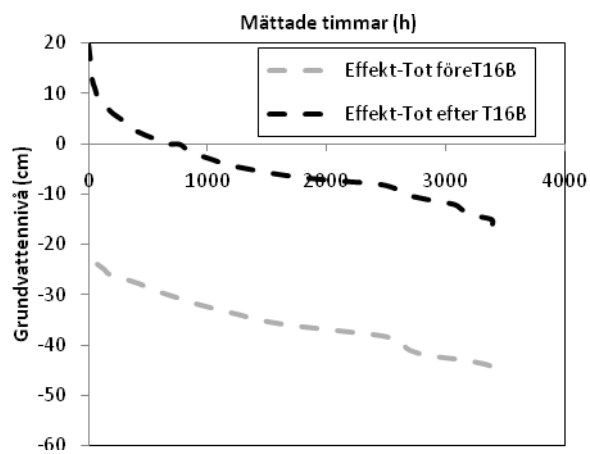


Effekt-Avr

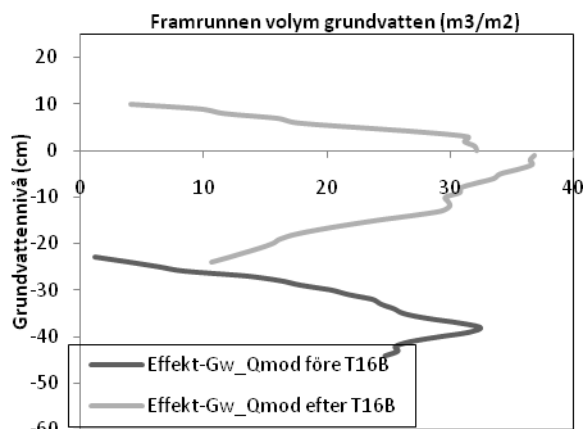
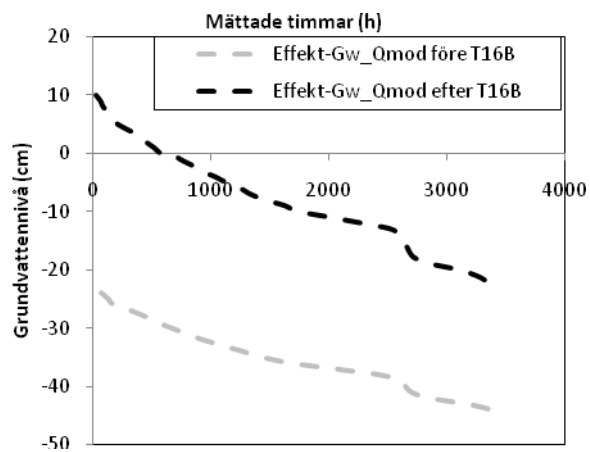


T16B

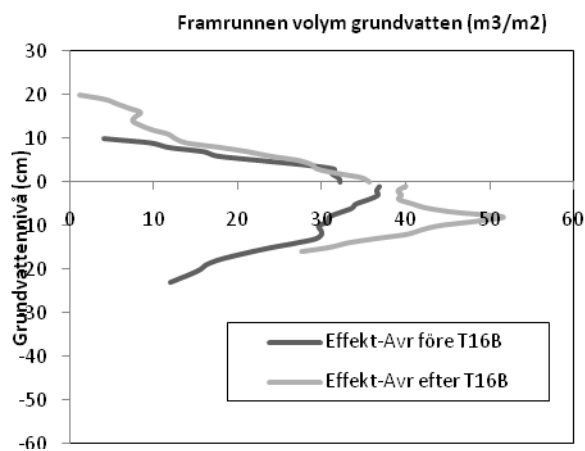
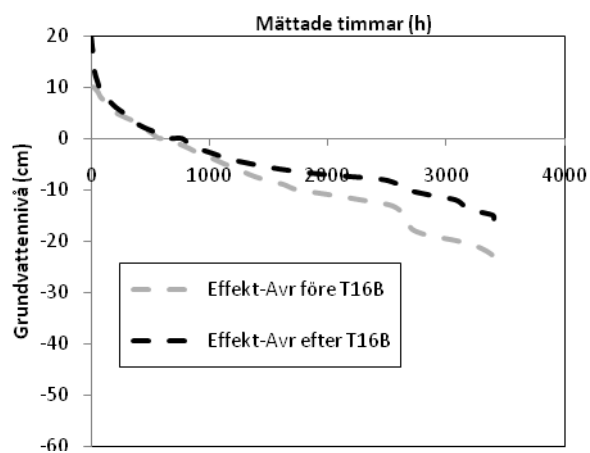
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

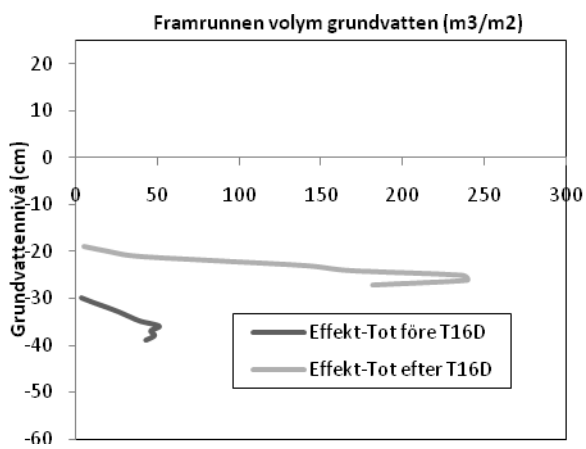
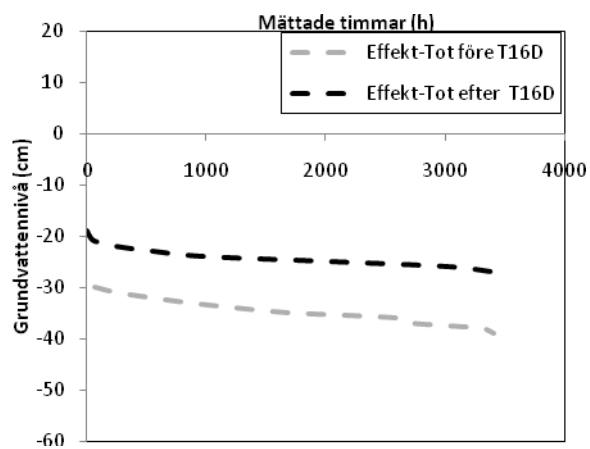


Effekt-Avr

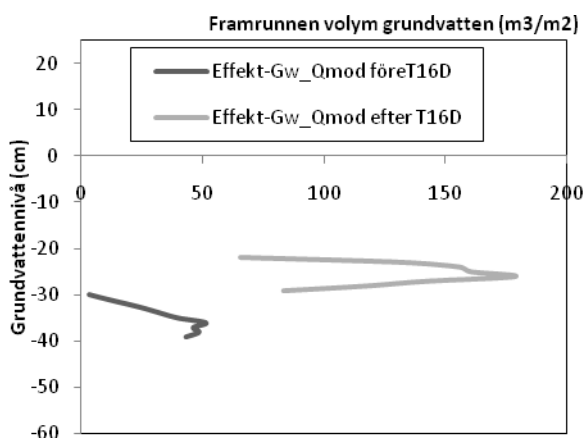
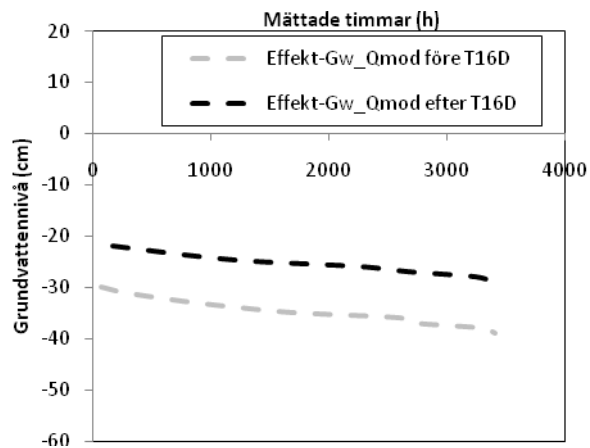


T16D

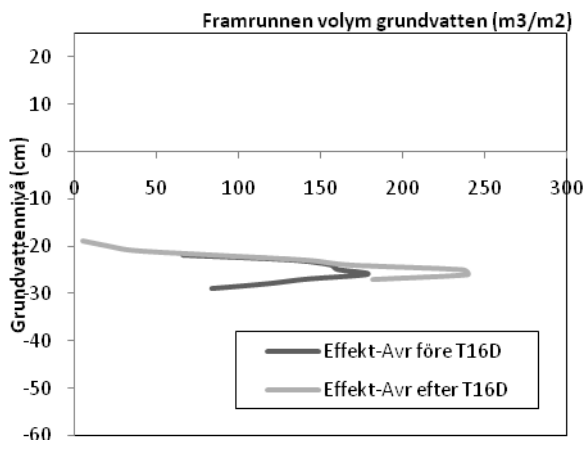
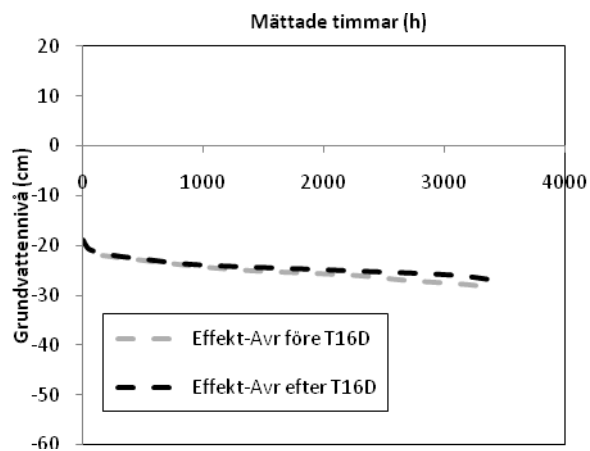
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

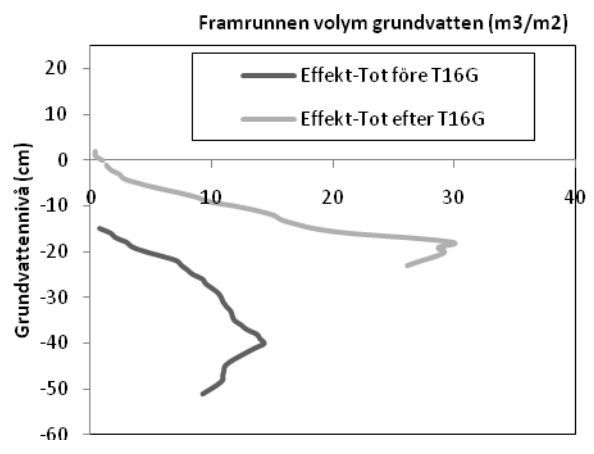
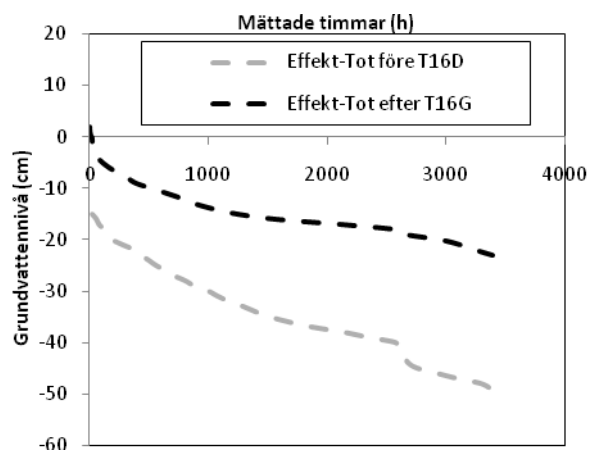


Effekt-Avr

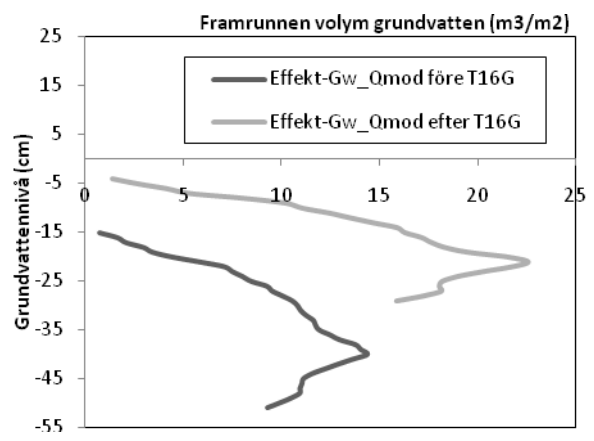
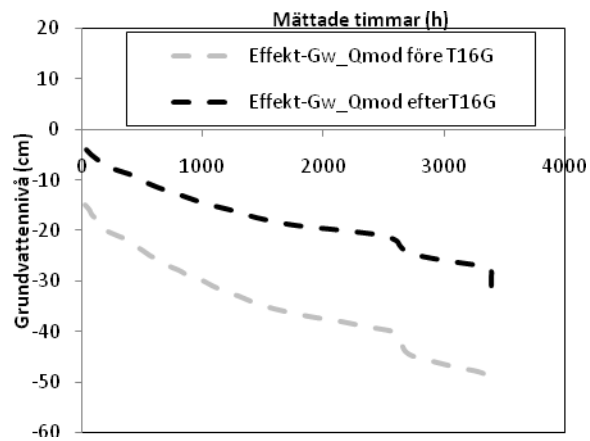


T16G

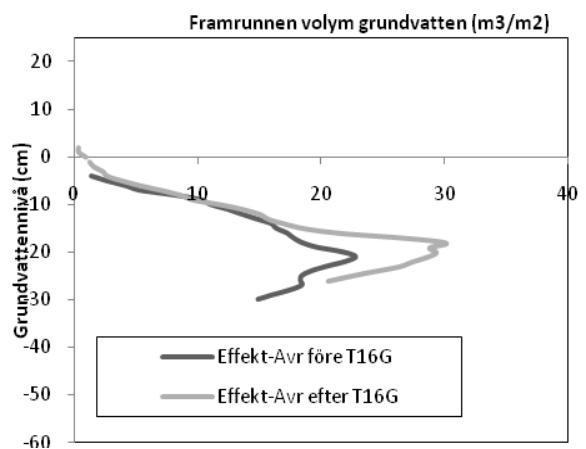
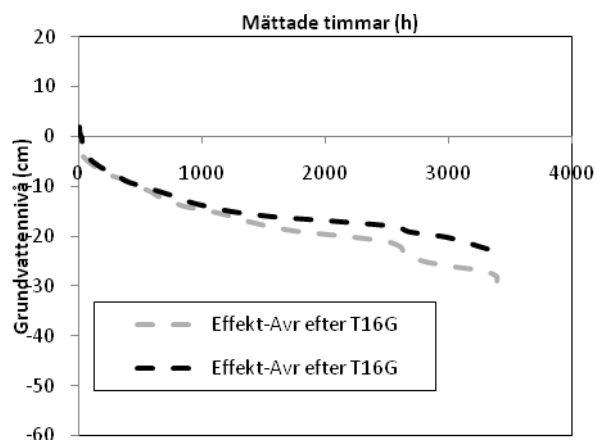
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

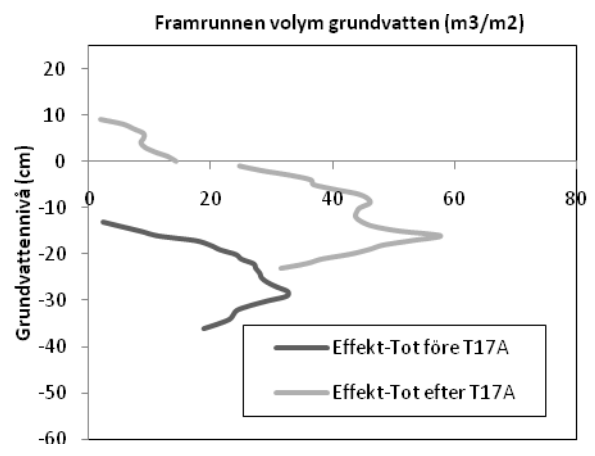
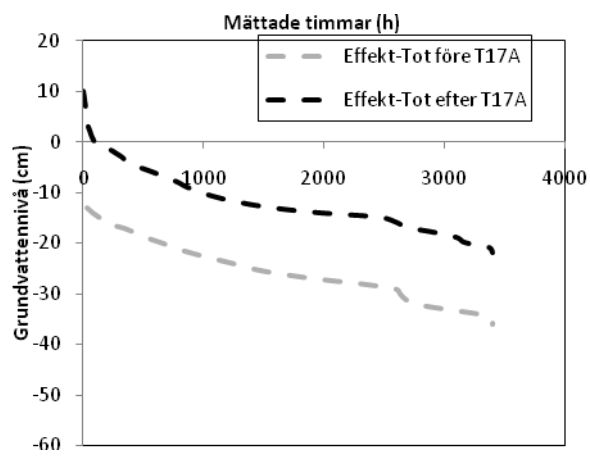


Effekt-Avr

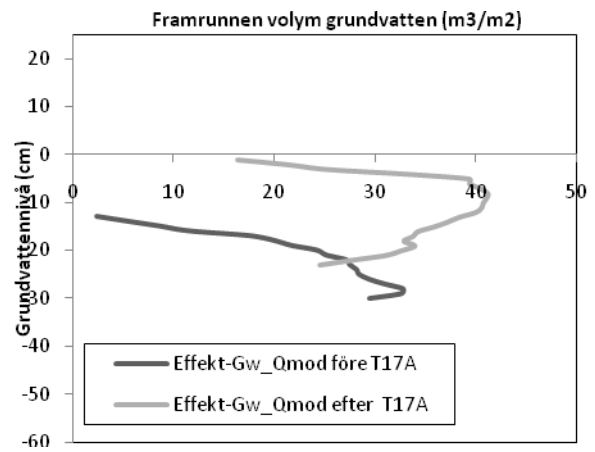
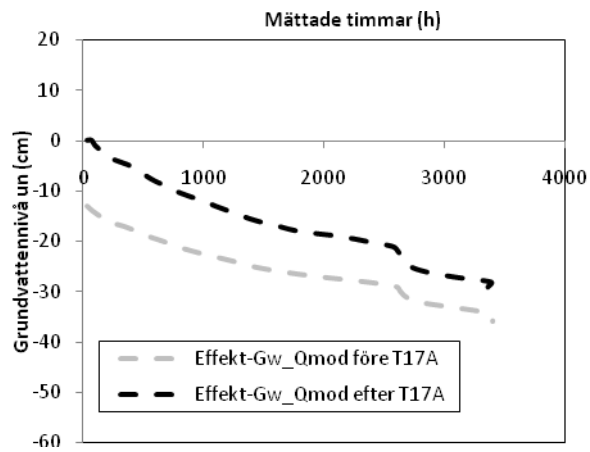


T17A

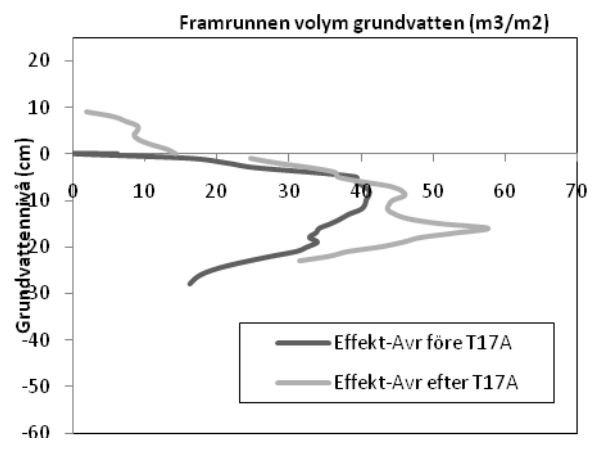
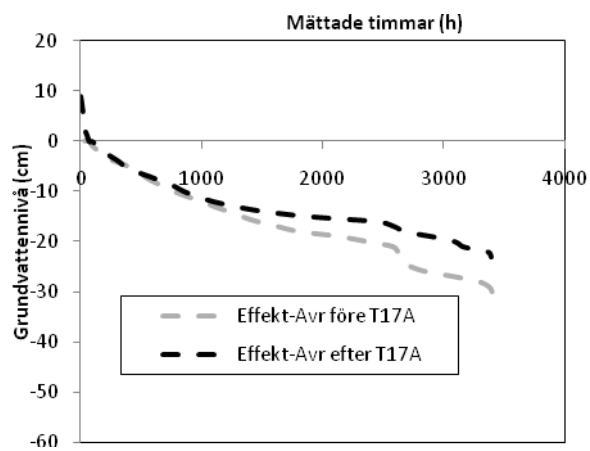
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod

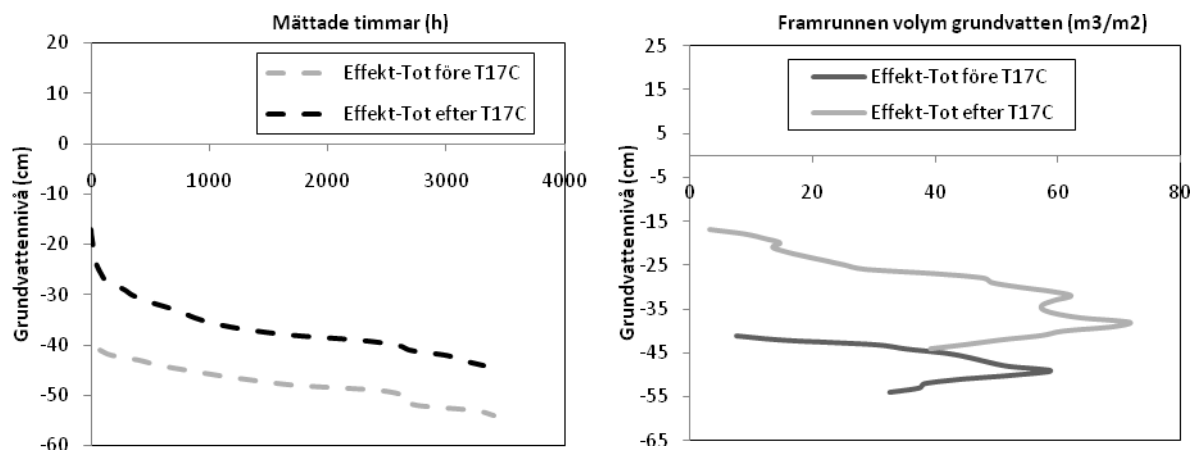


Effekt-Avr

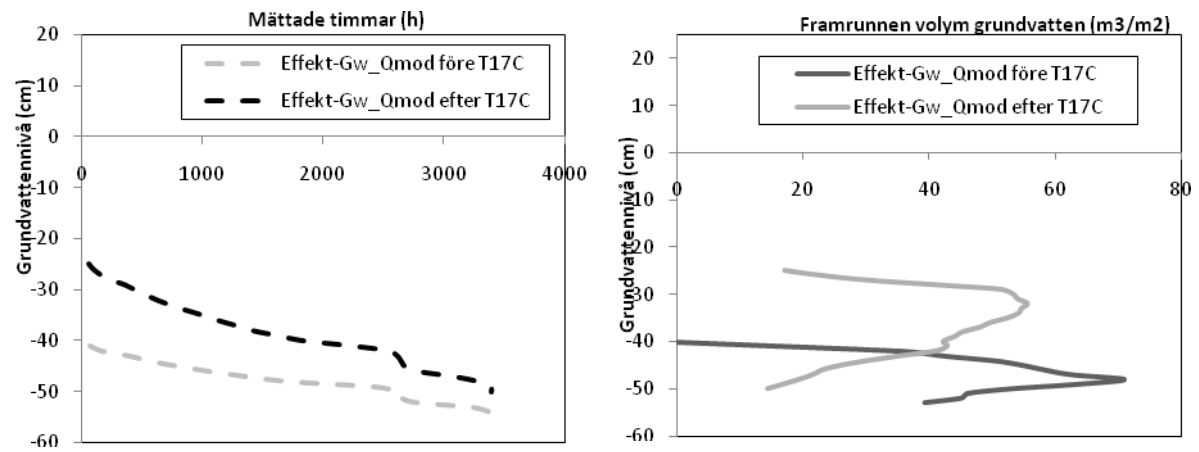


T17C

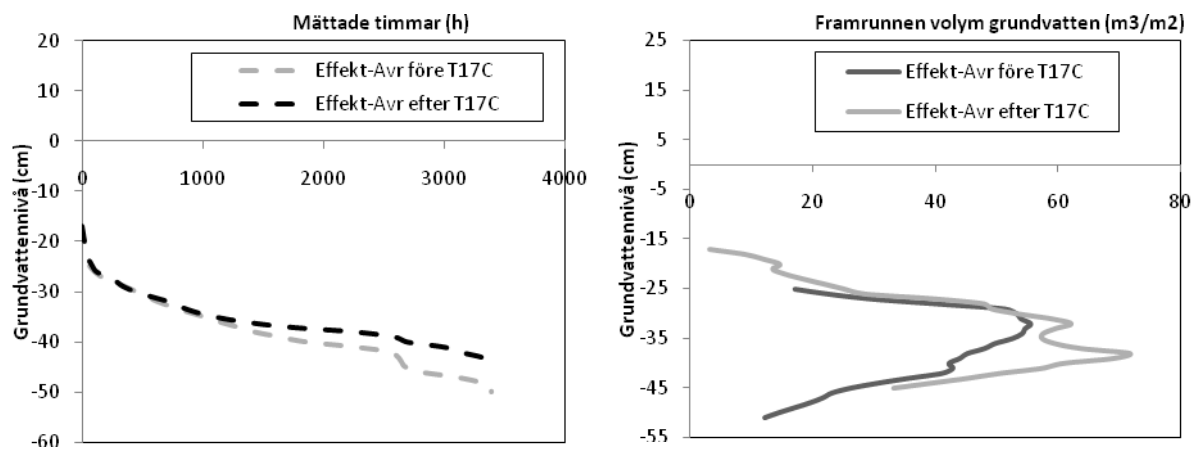
Effekt-Tot



Effekt-Gw_Qmod



Effekt-Avr



BILAGA H. Sammanställning av resultat för metoderna

Medelvärden för grundvattenytans läge samt intervallet för 10 och 90:e percentilen av grundvattenytans fluktuation för testerna av grundvattenytans läge i marken.

	Medelgrundvattennivå (cm)						Intervallet mellan 10 % - 90 % av mättad tid					
	Effekt-Tot		Effekt-Gw_Qmod		Effekt-Avr		Effekt-Tot		Effekt-Gw_Qmod		Effekt-Avr	
	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter
T3B	-	-	-32.9	-29.8	-	-	-	-	9.1	14.8	-	-
T3E	-	-	-10.9	-14.8	-	-	-	-	7.5	19.1	-	-
T5A	-	-	-21.5	-14.2	-	-	-	-	32.9	30.4	-	-
T5E	-	-	-15.2	-4.0	-	-	-	-	17.3	26.7	-	-
T10B	-17.8	-15.0	-17.8	-16.4	-16.4	-15.0	12.0	15.4	12.0	16.8	16.8	15.4
T10G	-31.4	-20.3	-31.4	-21.4	-21.4	-20.3	34.0	12.2	34.0	13.2	13.2	12.2
T11A	-24.0	-7.5	-24.0	-9.2	-9.2	-7.5	23.9	19.6	23.9	21.3	21.3	19.6
T11C	-24.2	-18.7	-24.2	-20.0	-20.0	-18.7	12.0	6.6	12.0	9.7	9.7	6.5
T16B	-36.2	-5.8	-36.2	-9.2	-9.2	-5.8	15.6	16.6	15.6	24.6	24.6	16.6
T16D	-35.6	-25.5	-35.6	-26.2	-26.2	-25.5	6.4	3.6	6.4	5.3	5.3	3.6
T16G	-35.7	-16.1	-35.7	-18.6	-18.7	-16.1	25.4	12.0	25.4	17.8	17.8	12.0
T17A	-26.4	-14.0	-26.4	-17.1	-17.1	-14.0	16.2	15.0	16.2	22.3	22.3	15.0
T17C	-48.4	-36.8	-48.4	-39.4	-39.4	-36.8	8.9	12.2	8.9	18.2	18.2	12.2

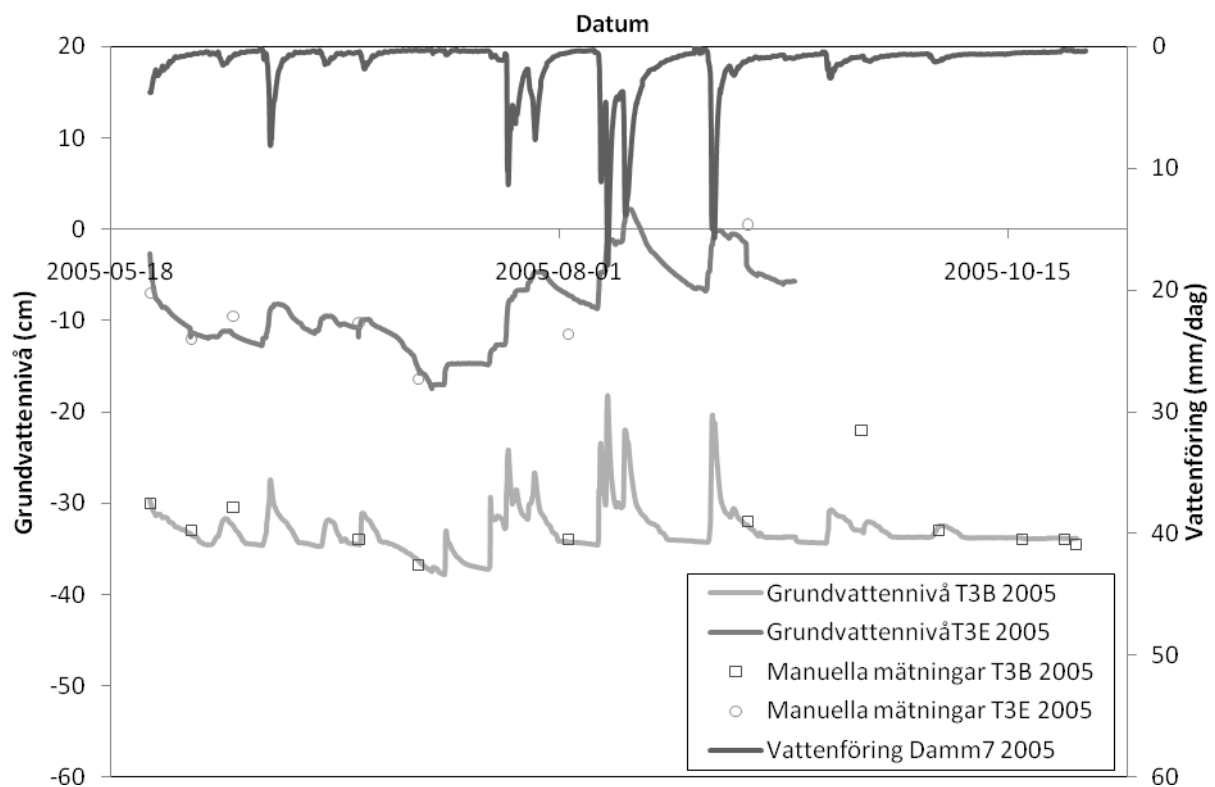
Maximal framrunnen volym grundvatten och den maximala volymen grundvatten på en nivå i marken för de olika metoderna.

	Lateralt flöde (m ³ /m ²)						Maximala lateral flödets nivå i marken (cm)					
	Effekt-Tot		Effekt-Gw_Qmod		Effekt-Avr		Effekt-Tot		Effekt-Gw_Qmod		Effekt-Avr	
	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter	Före	Efter
T3B	-	-	118.1	66.2	-	-	-	-	-29.0	-24.0	-	-
T3E	-	-	20.3	20.2	-	-	-	-	-14.0	-11.0	-	-
T5A	-	-	31.4	22.5	-	-	-	-	-10.0	-8.0	-	-
T5E	-	-	43.0	21.2	-	-	-	-	-9.0	-1.0	-	-
T10B	73.0	95.5	73.0	82.1	92.9	95.5	-19.0	-16.0	-19.0	-11.0	-12.0	-16.0
T10G	24.6	124.8	24.6	114.5	114.5	124.8	-17.0	0.0	-17.0	-17.0	-17.0	-17.0
T11A	28.7	96.6	28.7	87.7	87.7	96.6	-28.0	-1.0	-28.0	-1.0	-1.0	-1.0
T11C	84.6	206.4	84.6	135.5	135.5	206.6	-25.0	-19.0	-25.0	-17.0	-17.0	-19.0
T16B	30.6	51.6	32.5	36.8	36.8	51.6	-38.0	-8.0	-38.0	-3.0	-1.0	-8.0
T16D	51.3	239.3	51.3	179.1	179.1	239.3	-36.0	-26.0	-36.0	-26.0	-26.0	-26.0
T16G	14.4	30.0	14.4	22.6	22.8	30.2	-40.0	-36.0	-40.0	-21.0	-21.0	-18.0
T17A	32.7	57.6	32.7	41.2	41.2	57.6	-28.0	-17.0	-28.0	-8.0	-8.0	-16.0
T17C	58.9	71.8	70.8	55.5	55.5	71.8	-49.0	-38.0	-48.0	-32.0	-32.0	-38.0

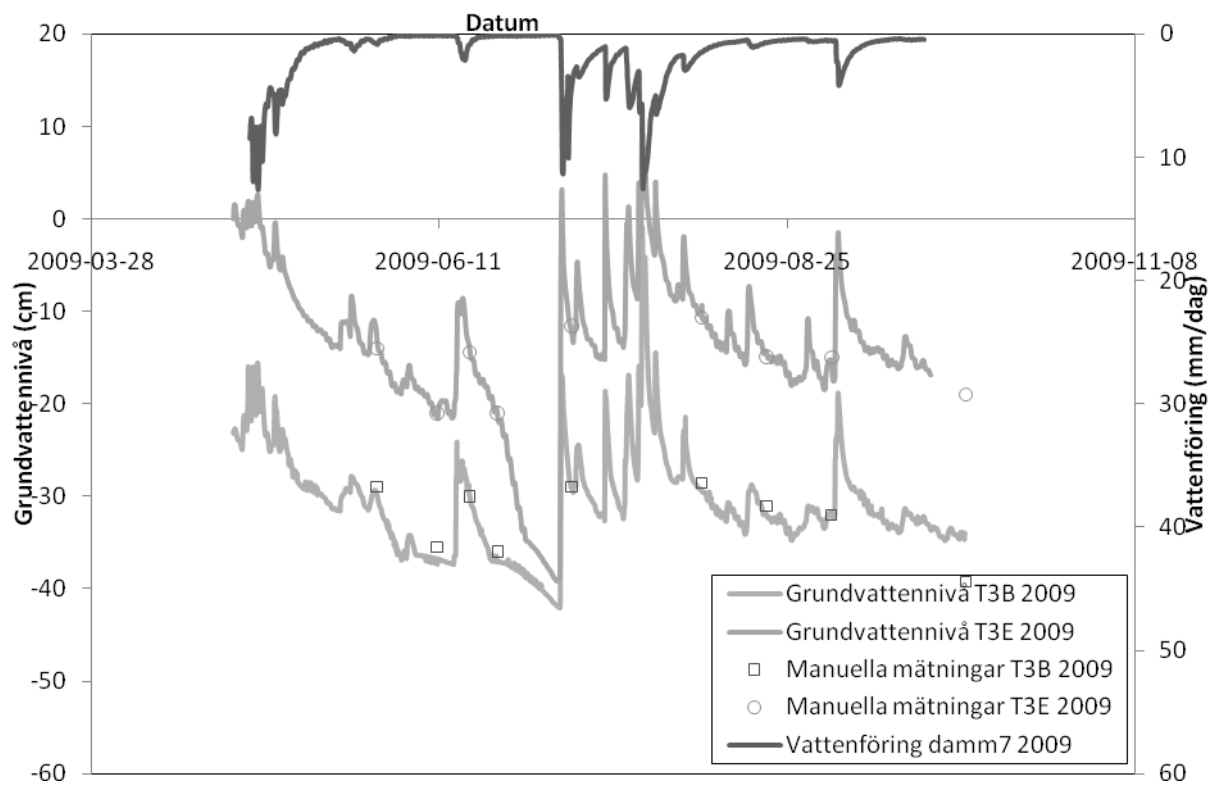
BILAGA I. Tidsserier

Tidsserierna för de kalibrerade grundvattennivåerna med de manuella grundvattennivå mätningarna inlagda samt vattenföringen för den vattenföringsstation som har använts.

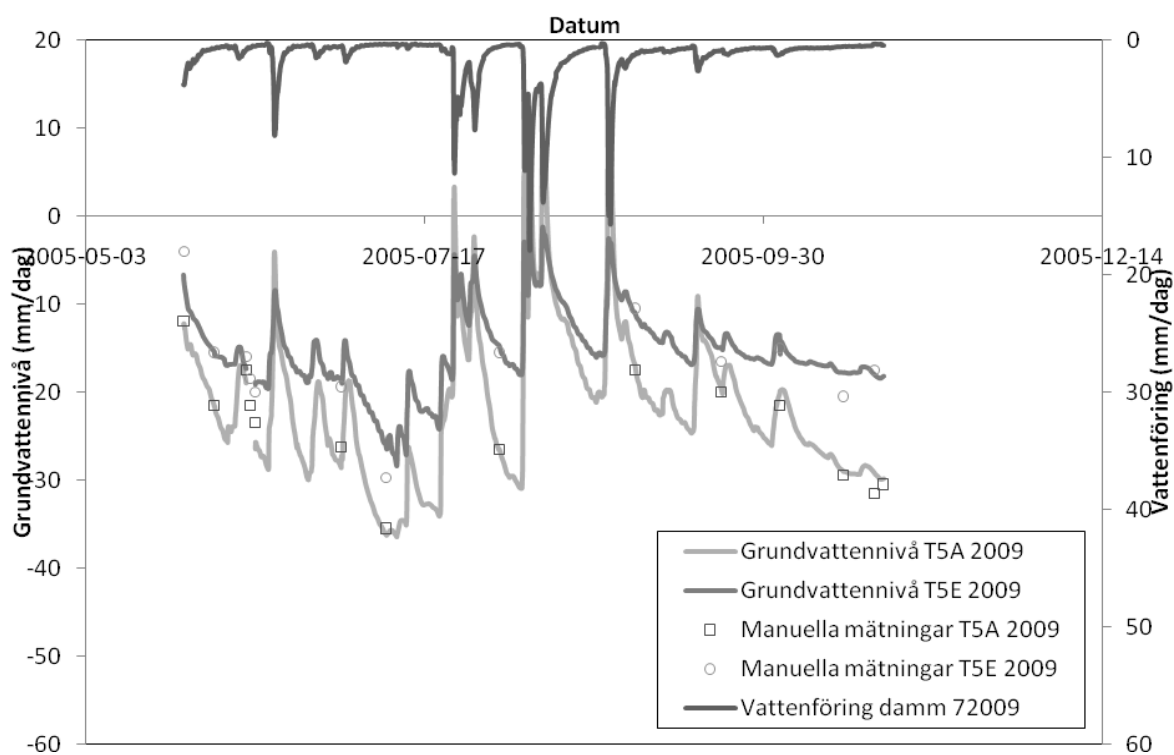
T3 2005



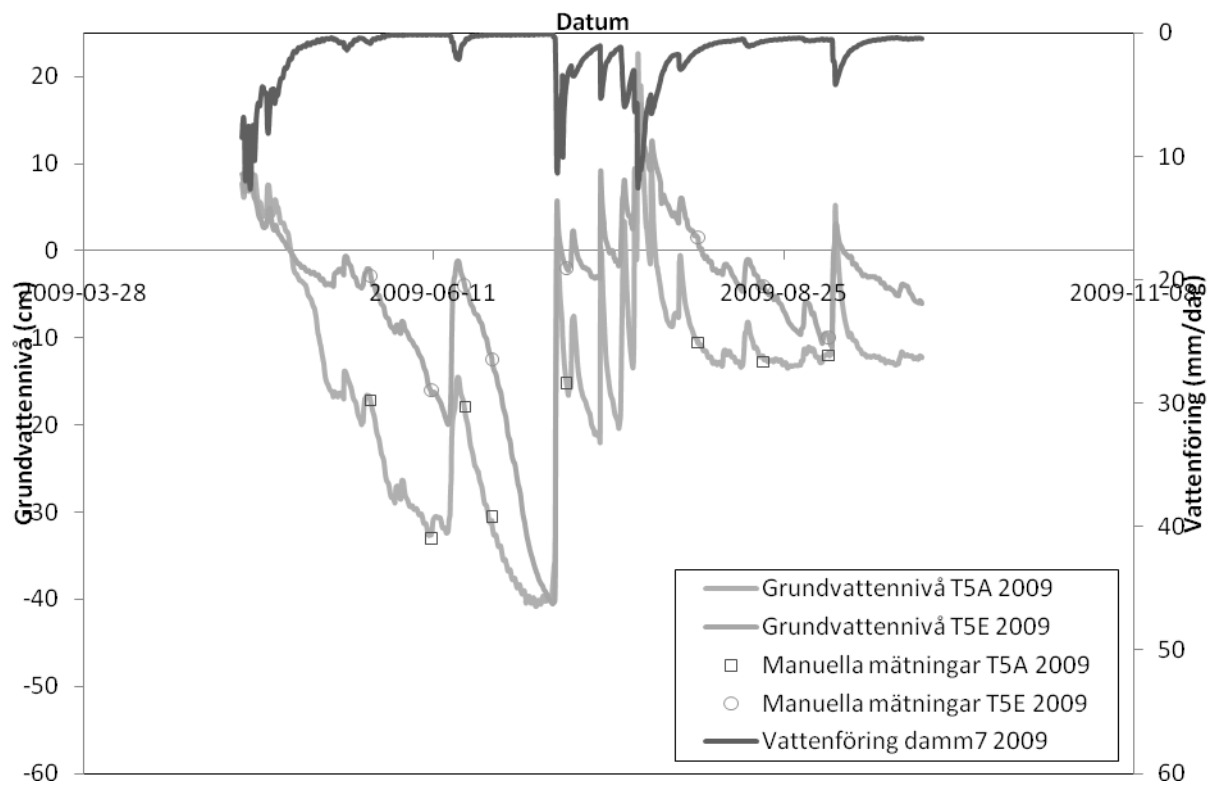
T3 2009



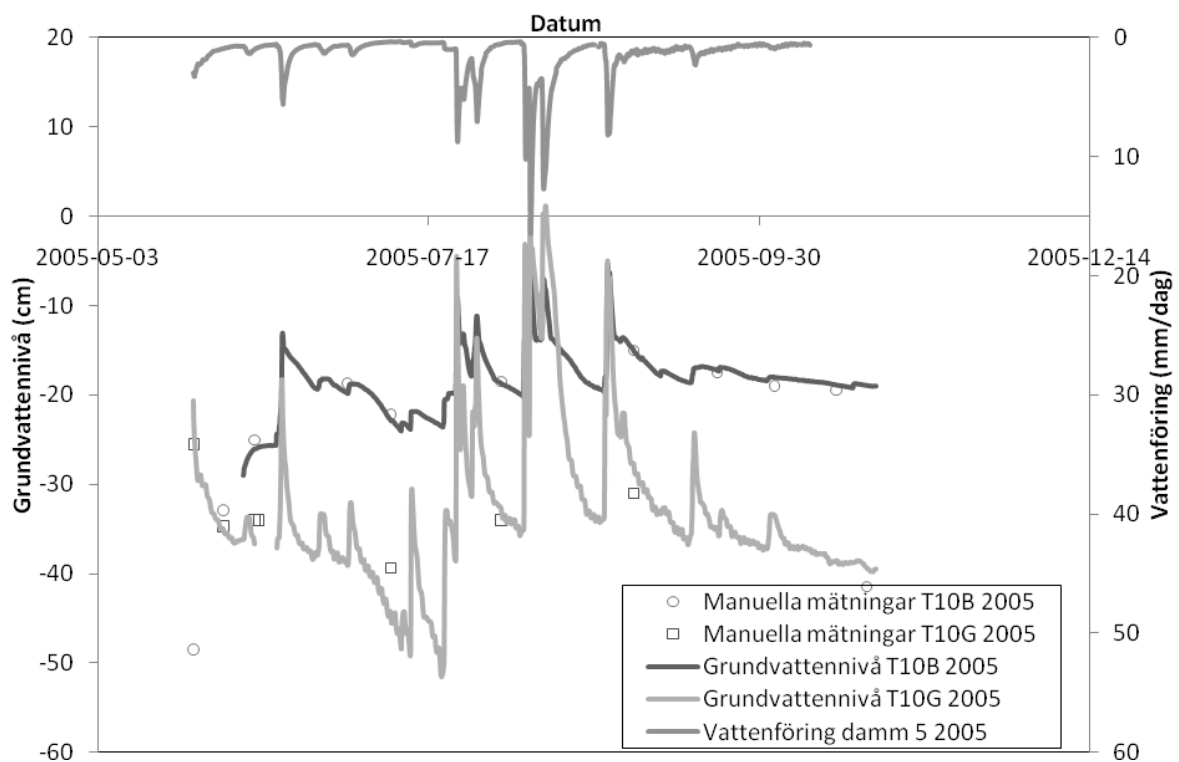
T5 2005



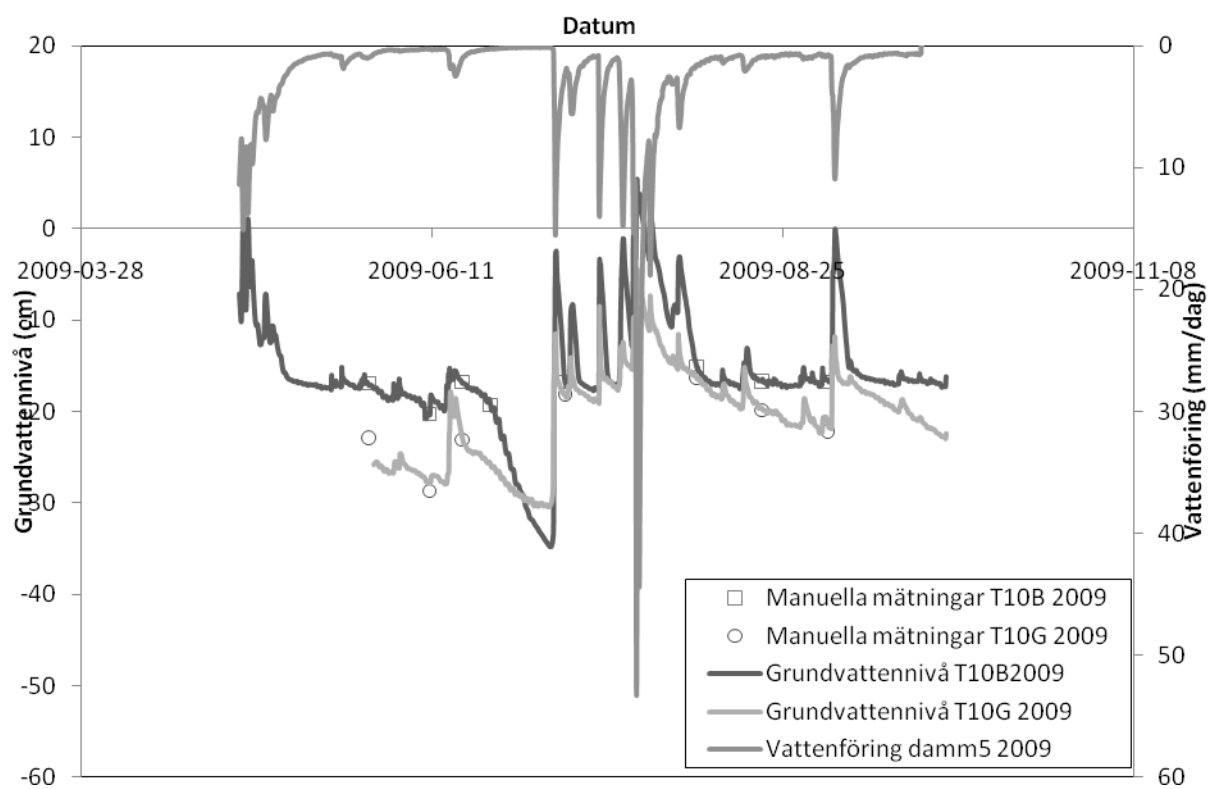
T5 2009



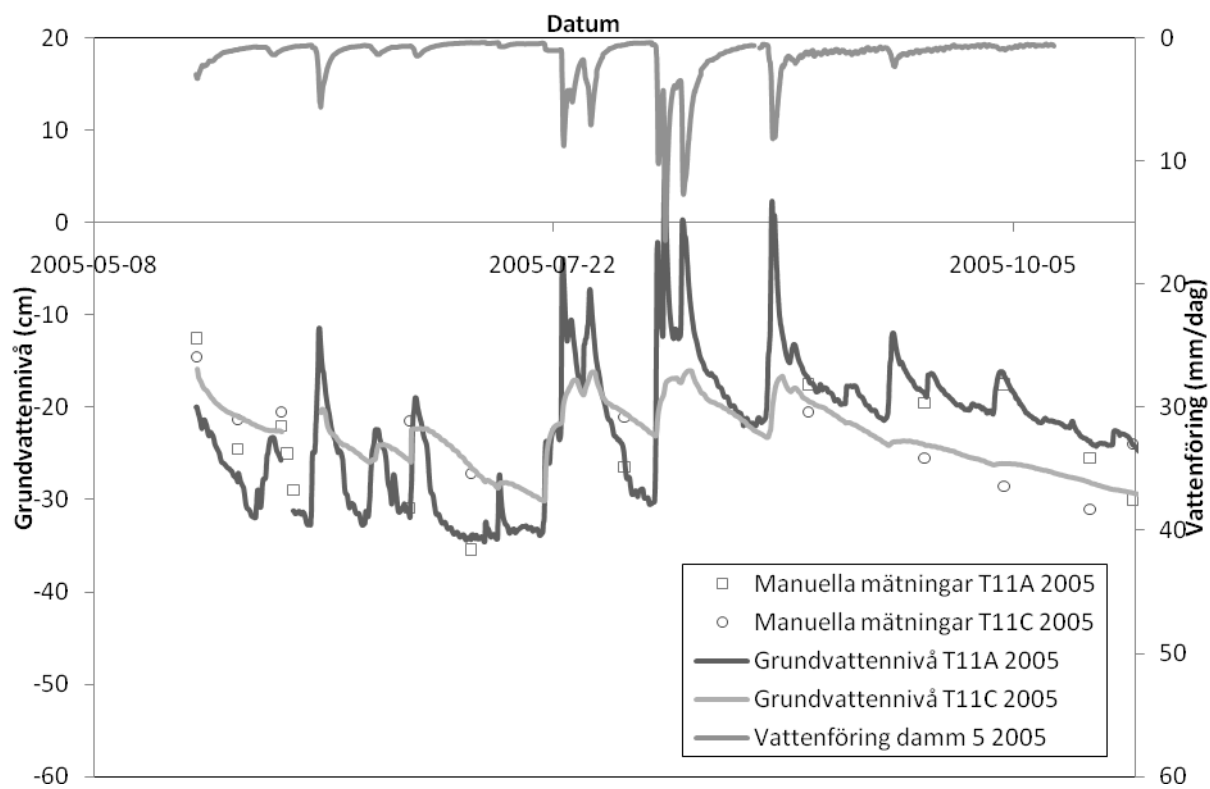
T10 2005



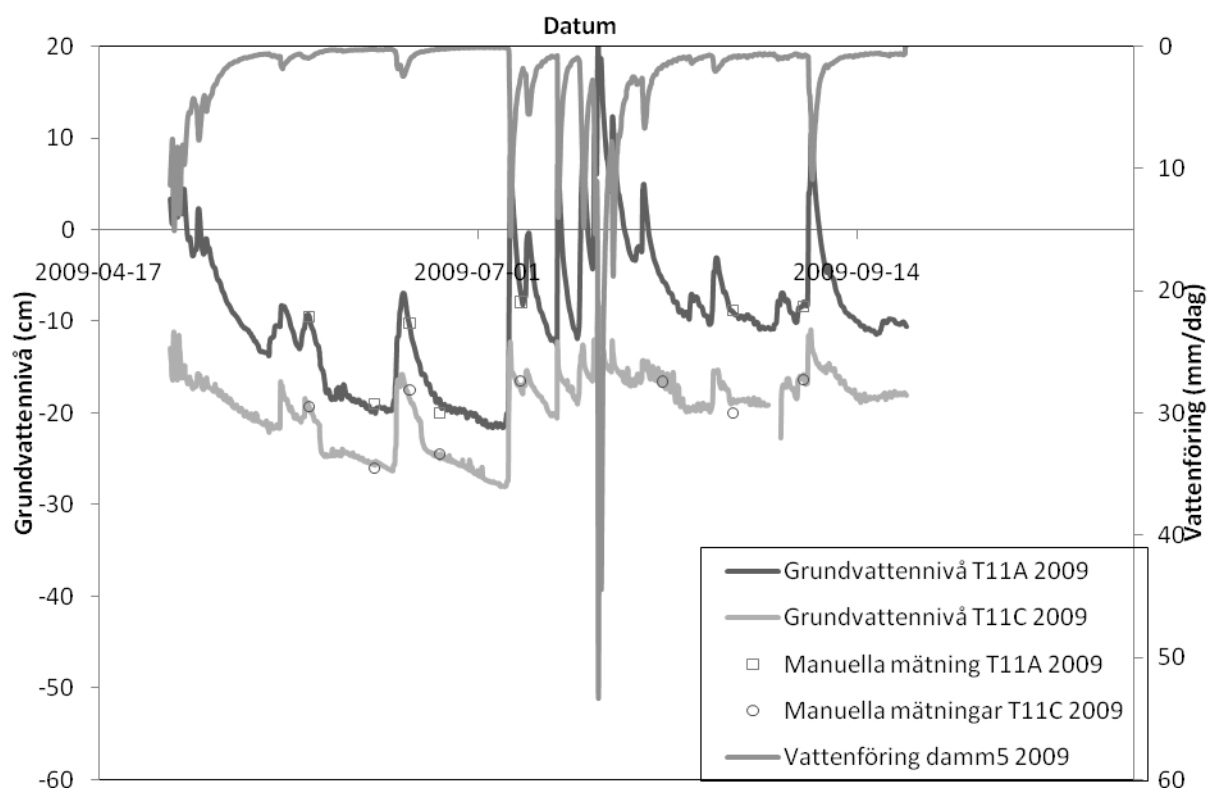
T10 2009



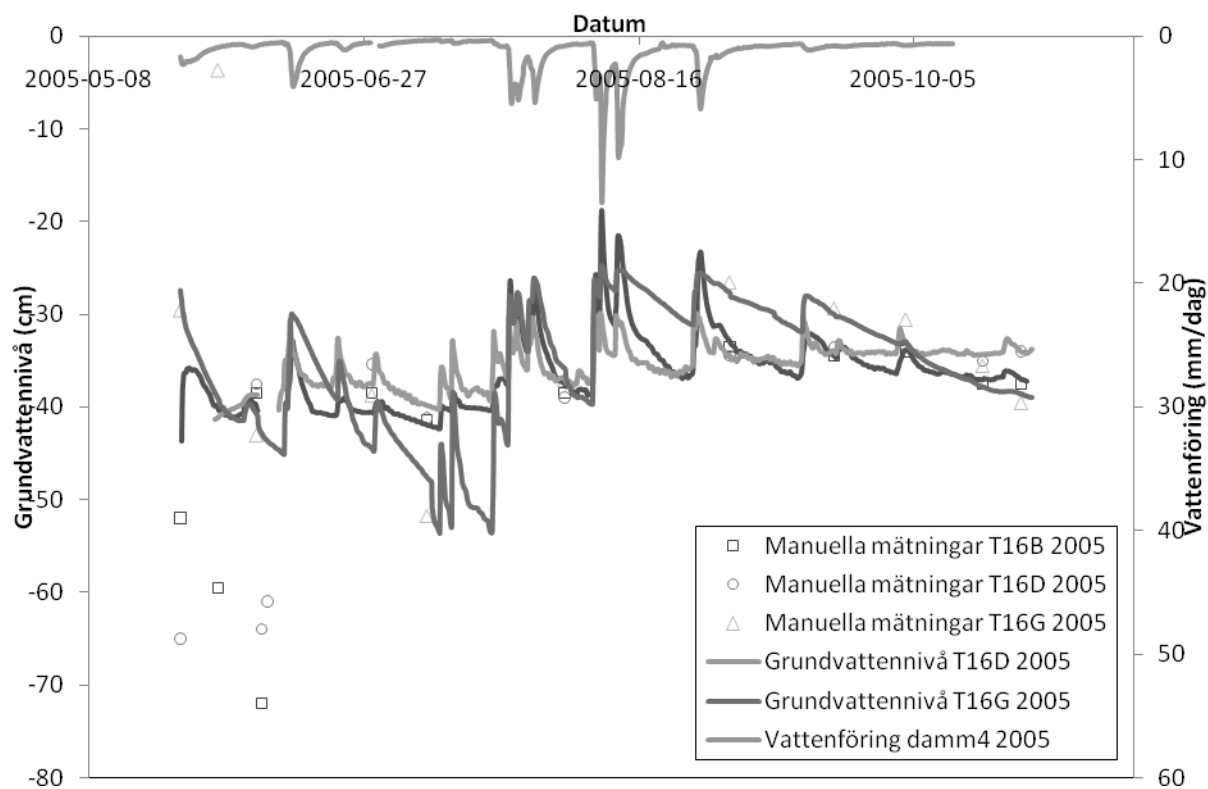
T11 2005



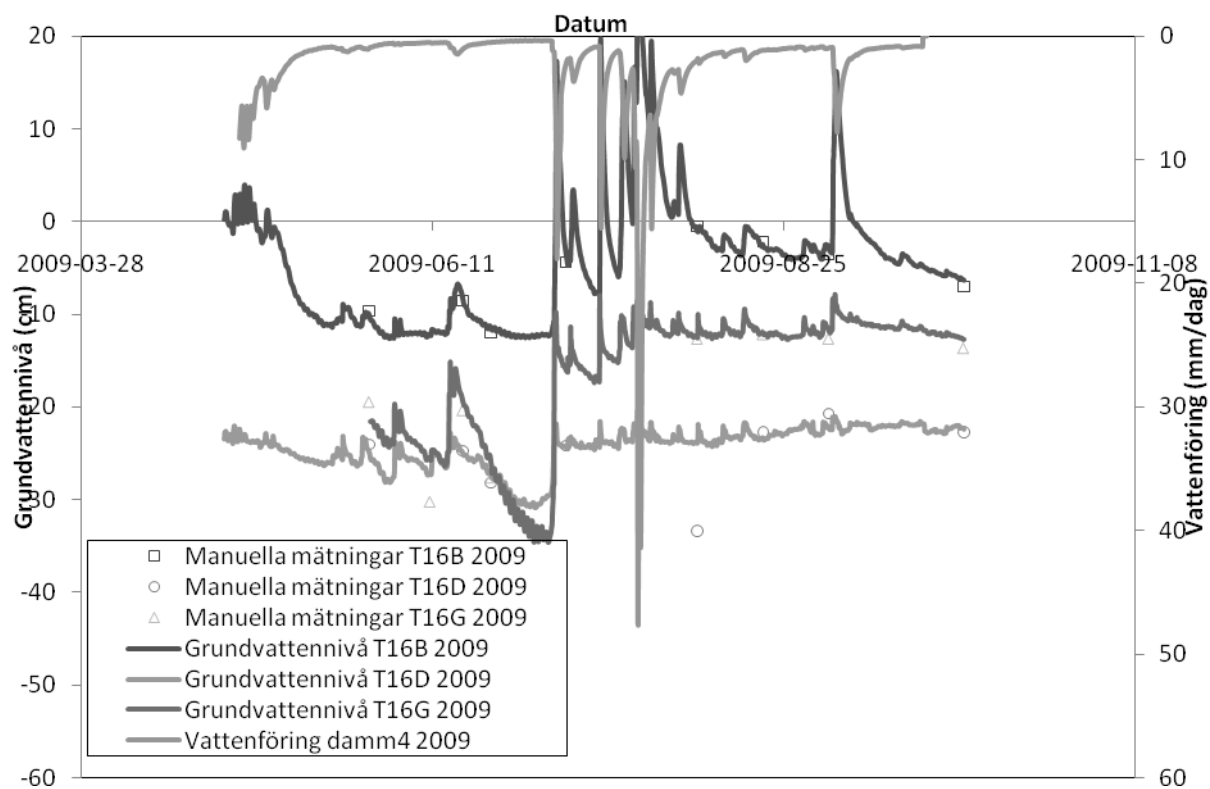
T11 2009



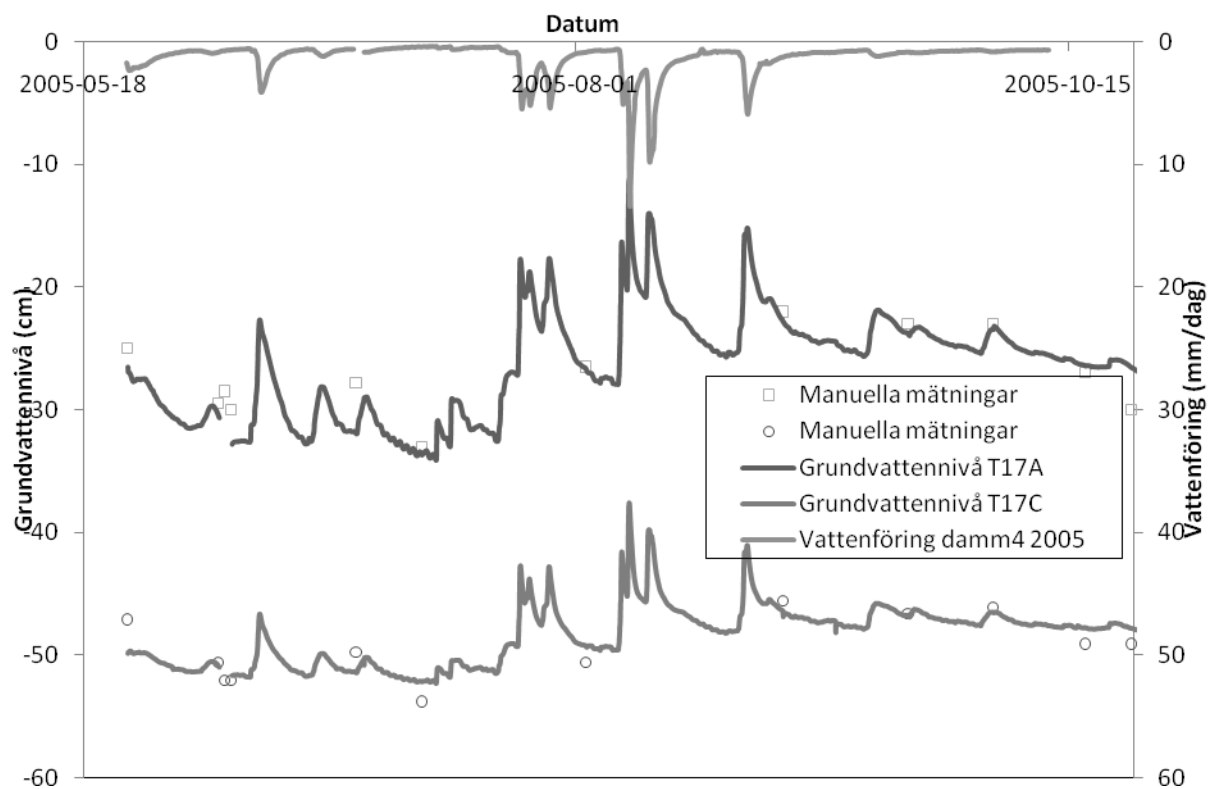
T16 2005



T16 2009



T17 2005



T17 2009

